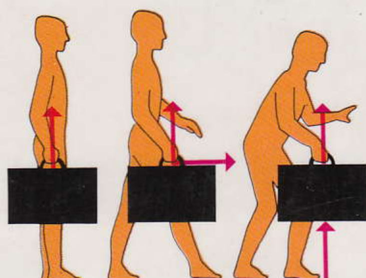
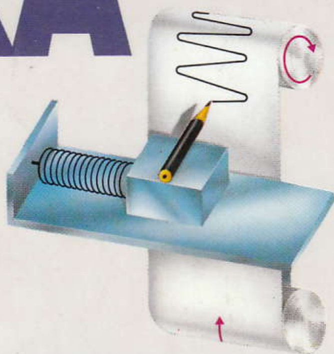
ILIUSTRUOTAS ŽINYNAS

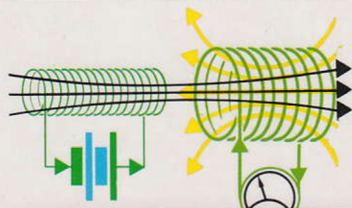
FIZIKA

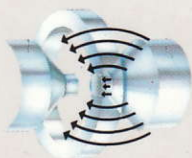
MECHANIKA



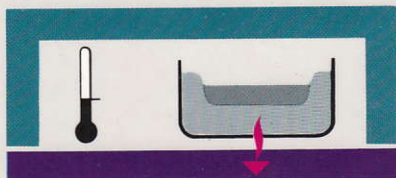


ELEKTRA IR MAGNETIZMAS





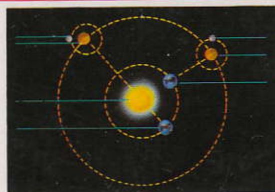
ŠILUMINIAI REIŠKINIAI



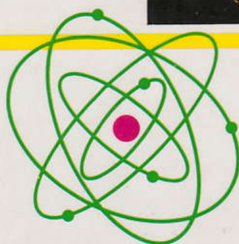


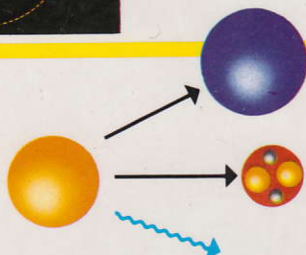
OPTIKA





ATOMO FIZIKA





ŠVIESA

UDK 53(031)
Fi-386

ATLANTI SCIENTIFICI GIUNTI
FISICA
Stefania De Curtis
Julián Fernández Ferrer
Giunti Gruppo Editoriale, Firenze
ISBN 88-09-00856-1

Autoriai **Stefania De Curtis, Julián Fernández Ferrer**

Iš italų kalbos vertė prof. PRANAS JUOZAS ŽILINSKAS

Vertimą recenzavo prof. ANTANAS RIMVIDAS BANDZAITIS

Lietuviško leidimo redaktorė ZITA ŠLIAVAITĖ

Iliustracija 2-ame puslapyje: burbulinės kameros vaizdas, nufotografuotas lekiant per ją neutrinams (vaizdas pateiktas spalvotas).
Rodyklė (→) nurodo teksto iliustraciją gretimame puslapyje. Kituose puslapiuose esančios iliustracijos nurodomos pateikiant prieš rodyklę puslapio numerį.

Fi-386 **Fizika**/Stefania De Curtis, Julián Fernández Ferrer. — Kaunas: Šviesa, 2000. — 94 p.: iliustr. — (Iliustruotas žinynas)
Žodyn., p. 89. — Dalyk. r-klė: p. 90—93. — Iliustr. r-klė, p. 94.
ISBN 5-430-02799-5
Šiame žinyne nagrinėjamos visos mokyklinio fizikos kurso temos: mechanika, šiluminiai reiškiniai, termodinamika, elektra, magnetizmas, optika ir atomo fizika. Kiekviena jų gausiai iliustruota piešiniais, schemomis bei diagramomis. Leidinio pabaigoje pateikta išsami dalykinė rodyklė padės greičiau susirasti reikiamą terminą.
Žinynas skiriamas vidurinės mokyklos mokiniams, jų mokytojams bei visiems, kas domisi fizika.
UDK 53(031)

Serija „Iliustruotas žinynas“
FIZIKA
Autoriai **Stefania De Curtis, Julián Fernández Ferrer**

Redaktorė *Zita Šliavaitė*
2000 03 29. Tir. 6000 egz. Leid. Nr. 14 305.
Akcinė bendrovė leidykla „Šviesa“, Vytauto pr. 25, 3000 Kaunas.
El. p. sviesa@balt.net
Interneto puslapis: http://www.sviesa.lt
Spausdinta Italijoje
Sutartinė kaina

ISBN 5-430-02799-5

TURINYS

Mechanika

Fizikiniai dydžiai

Fizika — gamtos mokslas, kuriame taikomi *moksliniai metodai*: eksperimentai, teikiantys reiškinį apibūdinančių dydžių (*fizikinių dydžių*) vertes ir jų sąryšius, leidžiančius matematiniais metodais numatyti naujus rezultatus. Eksperimentų rezultatai ir teorijos prognozės visada susijusios su *skaičiais*, todėl fizikoje vartojama *matematikos kalba*, kuri simboliškai, trumpa išraiška — *formule* — nusako visą dėsnį.

Žmogus, nagrinėjantis kūno kritimą ir neturintis supratimo apie fiziką, sako, kad iš pradžių nejudrus kūnas krinta vis greičiau. Tokia reiškinio samprata apytikslė ir nekonkreti. Šį reiškinį apibūdindami moksline kalba, sakytume, kad kūnas, buvęs rimties būsenos, krinta pastoviu pagreičiu, lygiu 9,8 m/s^2. Taip mes suvokiame judesį ir kiekvieną akimirką galime rasti kūno greitį bei buvimo vietą, gauti tikslų ir išsamų kūno judėjimo vaizdą.

Dydžio eilė

Fizikos pasauliui būdingi ir labai maži, ir labai dideli dydžiai: atomo matmenys ir visatos matmenys; laikas, per kurį šio lapo paviršiaus atspindėta šviesa pasiekia mūsų akis, ir visatos amžius; elektrono masė ir galaktikos masė. Pavyzdžiui, didžiausias atstumas iki tolimiausios žmogaus stebėtos galaktikos yra net šimtą milijonų milijonų milijonų milijonų (10^{26}) kartų didesnis už žmogaus ūgį (→ 1), o tuo tarpu nestabilios subatominės dalelės gyvavimo trukmė — vos šimtą tūkstančių milijonų milijonų milijonų (10^{23}) kartų mažesnė už laiko tarpą tarp dviejų širdies tvinksnių (→ 2).

Kalbėdami apie eksperimentais gaunamas atstumo, laiko ir masės dydžių vertes, turime vartoti vadinamąjį *dešimties laipsnį*. Pavyzdžiui, skaičių 10 daugindami tam tikrą skaičių kartų, gauname: $10 \times 10 = 100 = 10^2$, $10 \times 10 \times 10 = 1000 = 10^3$ ir t. t. Taigi skaičius, kuris rodo, kiek kartų yra dauginamas skaičius 10, vadinamas *dešimties laipsnio rodikliu*. Kai dešimties laipsnis yra trupmenos vardiklyje, prie laipsnio rodiklio rašomas minuso ženklas: $1/10 = 0{,}1 = 10^{-1}$, $1/100 = 0{,}01 = 10^{-2}$ ir t. t. Dešimties laipsnio rodiklis dar vadinamas *dydžio eile*.

Lentelė (→ 1) atspindi didžiulę atstumų visatoje ir pasaulyje įvairovę. Iš jos matyti, kad dešimties laipsnio rodiklis (dydžio eilė) gali skirtis daugiau negu 40 kartų.

Kitoje lentelėje (→ 2) parodyta, kiek kartų gali skirtis laiko tarpo (trukmės) dešimties laipsnio rodiklis (dydžio eilė).

Skaliariniai ir vektoriniai dydžiai

Tūris, masė, temperatūra, laikas, energija ir t. t. yra *skaliariniai dydžiai*, t. y. dydžiai, nusakomi skaičiumi, kuris, matuojant tų dydžių vertę, gali būti parodytas tam tikroje skalėje (tūrio, masės, temperatūros ir t. t.). Kiti dydžiai, kurie nusakomi ne tik skaičiumi, bet ir *krypties simboliu*, vadinami *vektoriniais dydžiais*. Nepakanka pasakyti, kad automobilis nuvažiavo 10 km atstumą, dar reikia patikslinti ir jo judėjimo kryptį.

Būdingi vektoriniai dydžiai yra kūno poslinkis ir greitis (→ 3), pagreitis ir jėga (→ 4), elektrinio lauko stipris (→ 5) ir magnetinė indukcija (→ 6).

Visi šie dydžiai yra vaizduojami *vektoriais* (→ 7), t. y. orientuotomis atkarpomis, rodančiomis kryptį. Kurio nors dydžio vektoriaus ilgis (*modulis*) rodo jo didumą, išreikštą tam tikrais vienetais.

Sakoma, kad du vektoriai yra *lygūs*, kai jų moduliai lygūs, o kryptys vienodos. Vektoriai paprastai žymimi paryškintu šriftu: ***a***, ***b***, ***c***, ... arba su rodyklėmis virš raidės: $\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{c}$, ...

Norint sudėti vektorius $\vec{a}$ ir $\vec{b}$, reikia vektoriaus $\vec{a}$ pradžią sujungti su vektoriaus $\vec{b}$ pabaiga. Tuomet vektorius $\vec{c}$ bus *suminis* (*atstojamasis*) *vektorius*: $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$ (→ 8).

Taip sumuoti galima bet kokį skaičių vektorių (→ 9). Nesunku įrodyti, kad suminio vektoriaus padėtis nepriklauso nuo to, kokia tvarka sudedami vektoriai (*perstatomumo*, arba *komutatyvumo, dėsnis*).

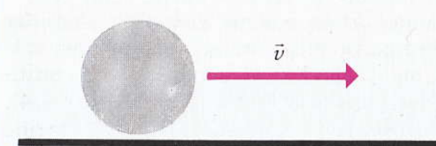
Fizikiniai dydžiai

Atstumas, matmenys	Jų didumas
Atstumas iki tolimiausios žmogaus stebėtos galaktikos	10^{26} m
Atstumas iki artimiausios galaktikos	10^{22} m
Atstumas iki artimiausios žvaigždės (šviesmetis)	10^{17} m
Atstumas iki Saulės	10^{11} m
Žemės skersmuo	10^{7} m
Vienas kilometras	10^{3} m
Žmogaus ūgis	10^{0} m (1 m)
Piršto storis	10^{-2} m
Popieriaus lapo storis	10^{-4} m
Bakterijos matmenys	10^{-5} m
Viruso matmenys	10^{-8} m
Atomo skersmuo	10^{-10} m
Atomo branduolio skersmuo	10^{-14} m

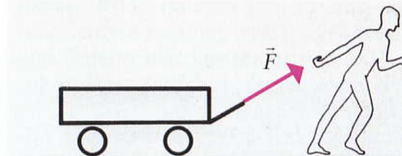
1. Atstumo ir matmenų kitimo ribos

Laiko tarpas, trukmė	Jų didumas
Visatos amžius	10^{17} s
Žemės ašies precesijos periodas	10^{12} s
Žmogaus gyvenimo trukmė	10^{9} s
Vieneri metai	10^{7} s
Viena para	10^{5} s
Saulės šviesos sklidimo iki Žemės trukmė	10^{3} s
Laiko tarpas tarp dviejų širdies tvinksnių	10^{0} s (1 s)
Laiko tarpas tarp dviejų musės sparnų plazdėjimų	10^{-3} s
Stroboskopinės lempos blyksnio trukmė	10^{-5} s
Lazerio impulso trukmė	10^{-9} s
Laiko tarpas, per kurį šviesa pereina atomą	10^{-18} s
Nestabilios subatominės dalelės gyvavimo trukmė	10^{-23} s

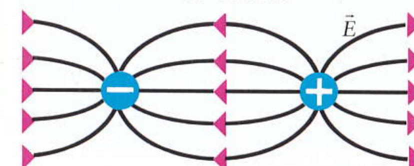
2. Laiko tarpo (trukmės) kitimo ribos



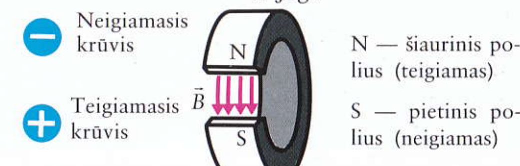
3. Greitis



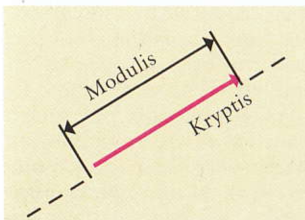
4. Jėga



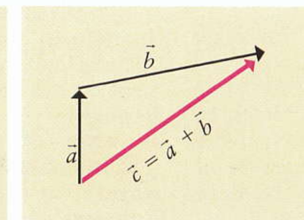
5. Elektrinis laukas



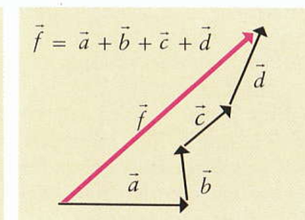
6. Magnetinis laukas



7. Vektorinis dydis



8. Vektorius $\vec{c}$ yra vektorių $\vec{a}$ ir $\vec{b}$ suma



9. Keleto vektorių suma

Kinematika

Judėjimas yra svarbiausias reiškinys, nagrinėjamas visų fizikos šakų: atomai juda bet kokios būsenos materijoje; elektronai judėdami kuria elektros srovę; planetos sukasi apie Saulę, netgi galaktikos juda erdvėje. Kinematika tiria kūnų judėjimą, neatsižvelgdama į jo atsiradimo priežastis.

Tolyginis tiesiaeigis judėjimas

Kaip pavyzdį išnagrinėkime automobilio judėjimą. Sakykime, automobilio spidomėtras rodo 72 km/h ir jo rodmenys nekinta. Tokį judėjimą vadiname *tolyginiu judėjimu*. Sekundmačiu matuokime laiką, per kurį automobilis nuvažiuoja nuo vieno šalikelę žyminčio stulpelio iki kito, nutolusio 100 m (→ 1). Sekundmatį įjunkime tą akimirką, kai automobilis važiuoja pro pirmąjį ženklą, ir sustabdykime, kai važiuoja pro antrąjį. Pastebėsime, kad automobilis šį atstumą įveikė per 5 s.

Pakartoję eksperimentą keletoje skirtingų vietų, gausime tą patį rezultatą (100 metrų per 5 sekundes). Taigi galime tvirtinti, kad iš tiesų 100 metrų automobilis nuvažiuoja per 5 sekundes, ir tokį judėjimą vadinti *tolyginiu judėjimu*.

Akivaizdu, kad 200 metrų automobilis nuvažiuos per 10 sekundžių arba 50 metrų — per 2,5 sekundės. Vadinasi, rezultatas bus toks pat: nuvažiuoto kelio ilgio ir laiko santykis lygus 20. Jis reiškia per vieną sekundę nuvažiuoto kelio ilgį. Nuvažiuoto kelio ilgio ir sugaišto laiko santykis vadinamas *greičiu*. Tolyginio judėjimo atveju šis santykis yra *pastovus*.

Greitį įprasta reikšti metrais per sekundę (m/s), centimetrais per sekundę (cm/s) ir kilometrais per valandą (km/h).

Kadangi vienas kilometras (1 km) lygus 1000 m, o viena valanda (1 h) turi 3600 s, tai galima nustatyti, kad nagrinėjamas automobilis tikrai važiuoja pastoviu greičiu, lygiu 72 km/h. Jei judančio kūno paliktas pėdsakas (*trajektorija*) yra tiesė, o greitis pastovus, tai sakoma, kad to kūno judėjimas yra *tolyginis tiesiaeigis*.

Grįžkime prie nagrinėto pavyzdžio. Įjunkime sekundmatį tą akimirką, kai automobilis važiuoja pro vieną iš stulpelių, ir to stulpelio vietą pavadinkime *atskaitos pradžia*. Tokia vieta paprastai žymima s_0 ir atitinka akimirką, kai pradedamas skaičiuoti laikas (t. y. $t = 0$). Raide s pažymėkime vietą, kurioje automobilis atsirado praėjus laikui t, o raide v — automobilio greitį (kai kūnas juda tiesiai ir tolygiai, jo greičio kryptis sutampa su judėjimo kryptimi). Tada $s - s_0$ bus nuvažiuoto kelio ilgis. Vadinasi, automobilio greitis

$$v = \frac{s - s_0}{t};$$

iš čia nuvažiuoto kelio ilgis

$$s = vt + s_0.$$

Tai yra *tolyginio tiesiaeigio judėjimo lygtis* (t. y. lygtis, kuria išreiškiamas *tolyginio tiesiaeigio judėjimo dėsnis*).

Grafinis judėjimo vaizdavimas

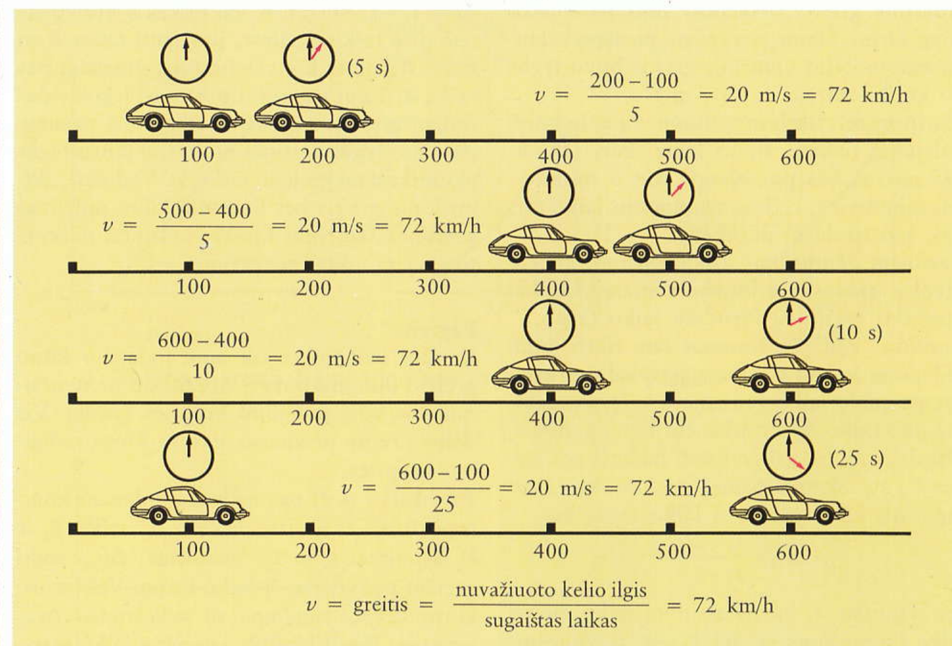
Kūno judėjimą galima pavaizduoti grafiškai koordinačių sistemoje, kurios horizontalioje (*abscisių*) ašyje atidedamas laikas, o vertikalioje (*ordinačių*) ašyje — nueito kelio ilgis. Judančio kūno padėtis kiekvieną akimirką koordinačių plokštumoje vaizduojama tašku, apibūdinančiu tą akimirką ir ją atitinkančią vietą. Kai kūnas juda tiesiai ir tolygiai, tokių taškų visuma yra *tiesė* (→ 2), kuri ir vadinama tolyginio tiesiaeigio judėjimo charakteristika.

Kūno judėjimą apibūdinančios tiesės *posvyris* geometriškai rodo greitį: kuo statesnė tiesė, tuo didesnis judančio kūno greitis.

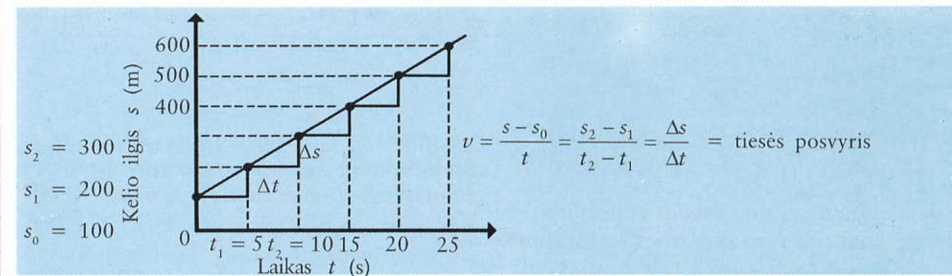
Vidutinis ir akimirkinis (momentinis) greitis

Sakykime, 100 km automobilis nuvažiuoja per 2 h. Taigi jo greitis lygus 50 km/h (→ 3). Galime pastebėti, kad šiame pavyzdyje judėjimo kryptis neminima (nagrinėjamas tolyginis tiesiaeigis judėjimas). Čia kalbama tik apie vidutinį greitį ir nesakoma, ar automobilis visą laiką važiuoja pastoviu 50 km/h greičiu, ar kartkartėmis stabteli ir vėl pradeda judėti. Jei pirmuosius 40 km automobilis nuvažiuoja per vieną valandą (pastoviu 40 km/h greičiu), o likusius kilometrus — per kitą valandą (pastoviu 60 km/h greičiu), tai automobilio *vidutinis greitis* visu keliu (randamas dalijant nuvažiuoto kelio ilgį iš sugaišto laiko) yra toks pat, kaip ir minėtas anksčiau — 50 km/h.

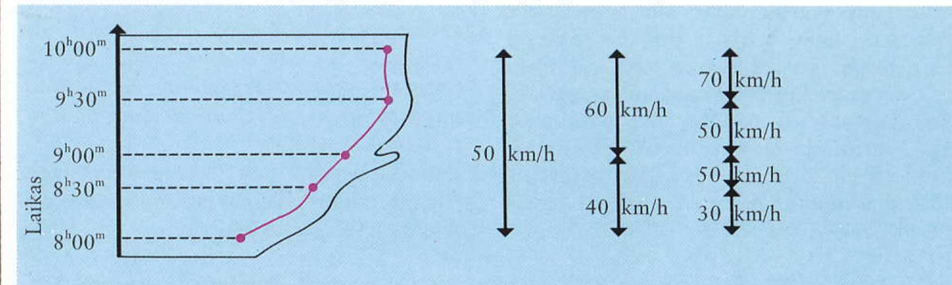
Tolyginis tiesiaeigis judėjimas



1. Tolyginio tiesiaeigio judėjimo pavyzdžiai



2. Tolyginio tiesiaeigio judėjimo diagrama



3. Vidutinis greitis to paties kelio skirtinguose ruožuose

Jeigu kūnas juda nepastoviu greičiu, tai vidutinis greitis priklauso nuo pasirinkto laiko tarpo. Šiame pavyzdyje pirmąją valandą automobilio vidutinis greitis buvo lygus 40 km/h, antrąją — 60 km/h.

Norint turėti tikslesnių duomenų apie kūno judėjimą, reikėtų žinoti kelią, kurį tas kūnas nueina kas pusvalandį, kas 5 minutes, kas minutę ir t. t.: kuo trumpesnis laiko tarpas, tuo tikslesni duomenys (→ 1).

Vartojant *akimirkinio* (*momentinio*) *greičio* sąvoką, atsirastų galimybė vienareikšmiškai nustatyti greitį, nenurodant laiko tarpo.

Tarkime, kad yra žinomas tam tikro kūno judėjimas ir kad jį galima pavaizduoti kreivės pavidalo laiko funkcija (→ 2). Pradėkime nuo taško A, atitinkančio kūno padėtį s_1 akimirką t_1. Jei galinė kūno padėtis yra taškas C, atitinkantis padėtį s_3 akimirką t_3, tai vidutinis kūno greitis šį laiko tarpą bus

$$v_{13} = \frac{s_3 - s_1}{t_3 - t_1}.$$

Jei akimirką t_2 kūnas atsidurs taške B, tai laiko tarpas sumažės iki $t_2 - t_1$ ir vidutinis kūno greitis bus

$$v_{12} = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}.$$

Kadangi

$$v_{12} < v_{13},$$

tai linijos, jungiančios taškus A ir B, posvyris bus mažesnis negu linijos, jungiančios taškus A ir C.

Toliau laipsniškai mažindami laiko tarpą ir drauge artėdami prie akimirkos t_1, turėsime vis mažesnį ir mažesnį vidutinį greitį. Iš tikrųjų šį veiksmą galėtume atlikti labai daug kartų. Tada, skaičiuodami vidutinį greitį per labai mažą laiko tarpą ir per dar mažesnį laiko tarpą, pastebėtume, kad vidutinio greičio vertės kinta vis mažiau ir mažiau. Taigi galėtume įsivaizduoti tokį mažą laiko tarpą, kurio tolesnis mažinimas nekeistų vidutinio greičio. Šis ribinis vidutinis greitis vadinamas *akimirkiniu greičiu* (v). Matematinė jo išraiška yra tokia:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}.$$

Geometriniu požiūriu, einant prie ribos, kai $\Delta t = t_2 - t_1 \to 0$, t. y. kai taškas B kreive artėja prie taško A, tiesė, jungianti tašką B su tašku A, virsta kreivės liestine, einančia per tašką A. Taigi tiesės BA posvyris, lygus vidutiniam greičiui v_{12}, šiame ribiniame procese pasidaro lygus liestinės posvyriui (kuris lygus akimirkiniam greičiui taške A). Vadinasi, akimirkinis greitis bet kuriame kūno judėjimo kreivės taške lygus kreivės liestinės, nubrėžtos per tą tašką, posvyriui (→ 2).

Pagreitis

Iki šiol kalbėjome tik apie judančio kūno greičio didumo pokytį Δv, tačiau nė neužsiminėme apie judėjimo krypties kitimą. Vis dėlto greitis priklauso ir nuo kūno judėjimo krypties.

Paveikslе (→ 3) pavaizduota judančio kūno trajektorija ir greitis $\vec{v}_1$ bei $\vec{v}_2$ taške P_1 ir P_2 akimirką t_1 ir t_2. Vektorius $\Delta\vec{v}_{21}$ rodo greičio pokytį per šį laiko tarpą. Vektorius, kurio kryptis sutampa su vektoriaus $\Delta\vec{v}_{21}$ kryptimi, yra vidutinis pagreitis laiko tarpą $t_2 - t_1$. Vidutinio pagreičio vektoriaus modulis lygus greičio pokyčio modulio ir laiko tarpo $t_2 - t_1$ santykiui:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}.$$

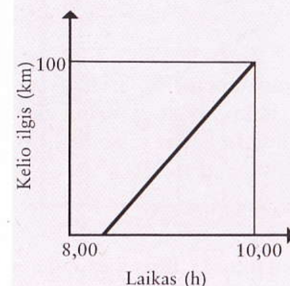
Jei akimirką t_2 artinsime prie akimirkos t_1, tai vidutinio pagreičio vektorius artės prie *akimirkinio* (*momentinio*) *pagreičio* vektoriaus, atitinkančio akimirką t_1, t. y. judančio kūno padėtį taške P_1. Galima parodyti, kad šis pagreičio vektorius yra toje pačioje plokštumoje, kaip ir trajektorijos liestinė bei pagrindinis statmuo (normalė) taške P_1, be to, nukreiptas į trajektorijos vidų. Pagreičio vektoriaus projekcijos vadinamos *liestiniu* (*tangentiniu*) ir *statmenuoju* (*normaliniu*) *pagreičiu* (→ 4).

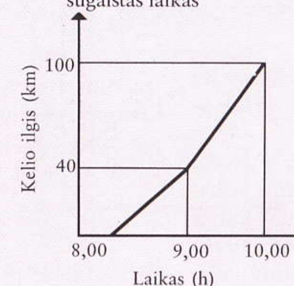
Liestinis pagreitis tam tikrame taške lygus greičio modulio pokyčio per mažą laiko tarpą ir to laiko tarpo santykiui:

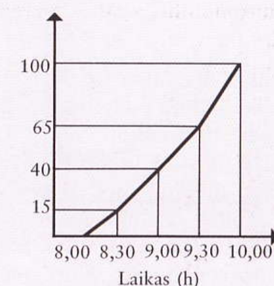
$$a_t = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

Kinematikos dydžiai

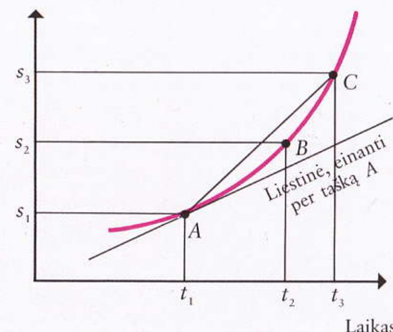
$$\bar{v} = \frac{\text{nueito kelio ilgis}}{\text{sugaištas laikas}} = 50 \text{ km/h}$$



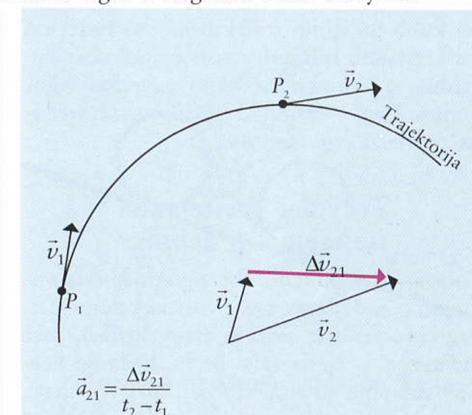




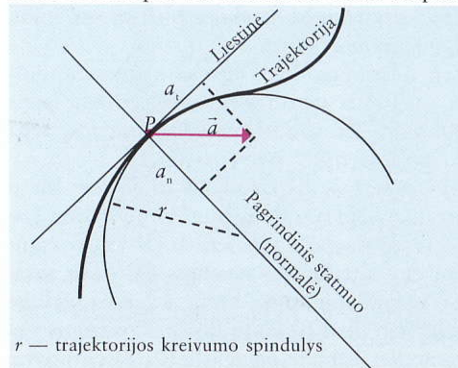
1. Vidutinis greitis lygus kūno nueito kelio ilgio ir sugaišto laiko santykiui



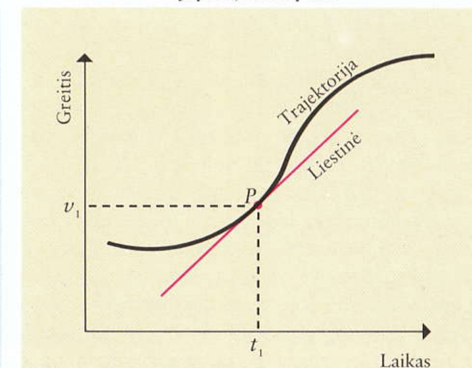
2. Akimirkinis greitis taške A — tai vidutinio greičio riba, kai imami vis mažesni poslinkiai taško A link per vis mažesnius laiko tarpus



3. Vidutinis pagreitis — greičio pokyčio ir laiko tarpo, per kurį tas pokytis įvyko, santykis



4. Pagreitis ($\vec{a}$), liestinis pagreitis (a_t) ir statmenasis pagreitis (a_n)



5. Kreivės posvyris taške P yra akimirkinio pagreičio vertė tame taške

Statmenasis pagreitis tame taške lygus kūno greičio v kvadratui, padalytam iš trajektorijos kreivumo spindulio r tame taške (→ 4):

$$a_n = \frac{v^2}{r}.$$

Pateikta diagrama (p. 9 → 5) vaizduoja ne judančio kūno padėties, bet greičio priklausomybę nuo laiko.

Kreivės liestinė, nubrėžta per tašką P, rodo greičio modulio pokytį per vienetinį laiką. Kai greičio modulis ilgainiui nekinta (kūnas juda tolygiai), kreivė yra horizontali (nulinio posvyrio) tiesė. Šiuo atveju galime tvirtinti, kad *tolyginio judėjimo pagreitis lygus nuliui.*

Jei kūno judėjimo trajektorija yra tiesė, tai jos kreivumo spindulys visuose taškuose begalinis, o statmenasis kūno pagreitis lygus nuliui. Taigi *tiesiaeigio judėjimo statmenasis pagreitis lygus nuliui.*

Tolygiai greitėjantis tiesiaeigis judėjimas

Tolygiai greitėjančiu tiesiaeigiu judėjimu vadinamas judėjimas pastoviu pagreičiu. Tas pagreitis yra tik liestinis (tangentinis), mat judėjimas — tiesiaeigis. Be to, kadangi liestinė sutampa su trajektorija, kuri yra tiesė, tai pagreitis yra tos pačios krypties vektorius, kaip ir greitis.

Pateikiant kūno judėjimo trajektoriją, nurodomas pagreičio modulis su pliuso arba minuso ženklu, priklausomai nuo to, ar pagreičio kryptis sutampa su kūno judėjimo kryptimi (tolygiai greitėjantis judėjimas), ar yra jai priešinga (tolygiai lėtėjantis judėjimas). Pastoviu laikomas toks pagreitis, kurio modulis ir kryptis nekinta.

Pagreitis, kaip žinome, lygus greičio prieaugiui per tam tikrą laiko tarpą, todėl jeigu pagreitis yra pastovus, tai greičio prieaugis per vienodus laiko tarpus yra vienodas (→ 1).

Jeigu judančio kūno greitį matavimo pradžioje (t = 0) pažymėsime v_0, o jo greitį akimirką t — raide v, tai greičio prieaugis (teigiamas ar neigiamas) per tą laiko tarpą bus $v - v_0$. Tada pagreitį rasime taip:

$$a = \frac{v - v_0}{t}.$$

Iš čia

$$v = v_0 + at.$$

Gavome tiesės, vaizduojančios greičio priklausomybę nuo laiko, lygtį. Norint rasti per laiką t kūno nueitą kelią, reikia apskaičiuoti vidutinį greitį $\bar{v}$ (→ 2):

$$\bar{v} = \frac{v_0 + v}{2} = \frac{v_0 + v_0 + at}{2} = v_0 + \frac{1}{2}at,$$

ir padauginti jį iš laiko t. Tada per laiką t kūno nueito kelio ilgis $s - s_0$ bus lygus

$$s - s_0 = v_0 t + \frac{1}{2}at^2.$$

Tai *tolygiai greitėjančio tiesiaeigio judėjimo lygtis* (→ 3).

Pagreičio matavimo vienetas SI sistemoje yra metras sekundei kvadratu (m/s²).

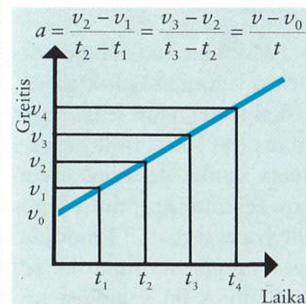
Laisvasis kūnų kritimas

Krintančius kūnus pirmasis ėmė tyrinėti G. Galilėjus (G. Galilei). Iš aukštai (pasakojama, kad nuo Pizos bokšto) mėtydamas skirtingos masės kūnus, jis nustatė, kad kūno masė neturi įtakos to kūno kritimo pagreičiui (→ 4, 5) ir kad laisvasis kūnų kritimas yra tolygiai greitėjantis judėjimas. Šiuolaikinėmis techninėmis priemonėmis galima patvirtinti G. Galilėjaus hipotezę. Pavyzdžiui, fotografuojant stroboskopiniu būdu, nesunku įrodyti, kad skirtingos masės rutuliai krinta tokiu pat pagreičiu (→ 6).

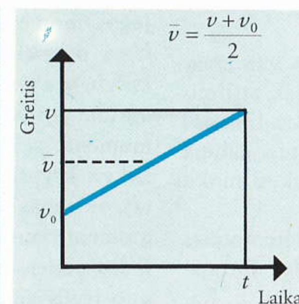
Yra nustatyta, kad laisvai krintančio kūno pagreitis netoli Žemės paviršiaus lygus 9,8 m/s². Tai vadinamasis *gravitacijos*, arba *laisvojo kritimo, pagreitis* (g).

Paveiksle (→ 7) parodytas tuo pačiu metu mestų dviejų rutulio formos kūnų stroboskopinis vaizdas: *1* kūnas krinta laisvai, o *2* kūnui dar suteikiamas pradinis gulsčiasis greitis. Lygindami abiejų kūnų judėjimą, galime pastebėti, kad tų kūnų kritimo pagreitis yra vienodas. Kitame paveiksle (→ 8) parodyta, kaip kinta *2* kūno greičio vektorius.

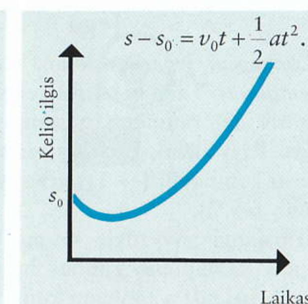
Tolygiai greitėjantis tiesiaeigis judėjimas



1. Tiesinis laiko ir greičio sąryšis



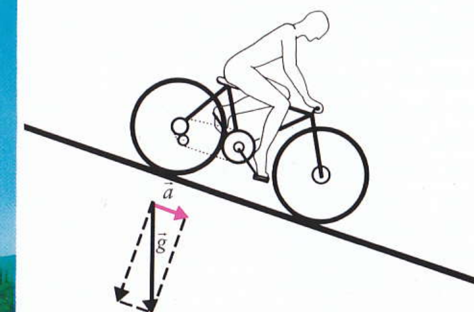
2. Vidutinis greitis yra pradinio bei galinio greičio aritmetinis vidurkis



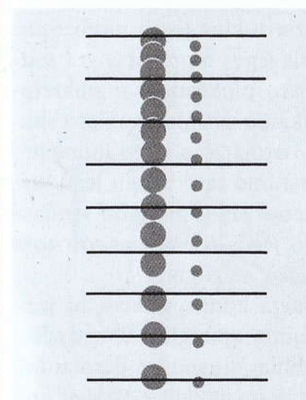
3. Tolygiai greitėjančio judėjimo diagrama



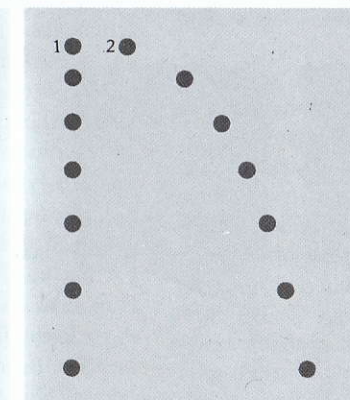
4. Laisvai krintančių kūnų pagreitis nepriklauso nuo tų kūnų masės



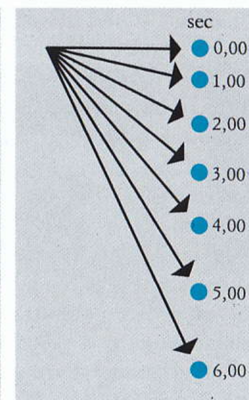
5. Be trinties plokštuma judančio kūno pagreitis yra laisvojo kritimo pagreičio vektoriaus projekcija toje plokštumoje



6. Du skirtingos masės rutuliai krinta tuo pačiu pagreičiu



7. Kūno kritimo pagreitis nepriklauso nuo to, ar kūnui suteiktas pradinis gulsčiasis greitis, ar ne



8. *2* rutulio (→ 7) greičio vektoriaus kitimas

Dinamika

Jėga

Dažniausiai *jėga* suvokiama kaip *raumenų įtempimas*. Taigi bet koks veiksmas, atsirandantis dėl raumenų pastangų, vadinamas *jėga*. Pavyzdžiui, įtempus raumenis, galima mesti kamuolėlį (→ 1a) arba išlaikyti sunkų kūną (→ 2).

Pirmajame pavyzdyje raumenų įtempimas keičia kamuolėlio rimties būseną, antrajame — neleidžia sunkiam kūnui nukristi. Kamuolėlio judėjimo kryptį galima keisti, pavyzdžiui, įtempus raumenis bei mostelėjus rakete taip, kaip ir žaidžiant tenisą (→ 1b).

Iš šių paprastų pavyzdžių galima padaryti tokią išvadą: *bet kokia priežastis, galinti keisti kūno rimties būseną arba jo judėjimą, yra jėga.*

Raumenų įtempimas suteikia kūno judėjimui ne tik kryptį, bet ir didesnį ar mažesnį greitį. Jėga yra *vektorinis dydis*. Tai parodyta tolesniame paveiksle (→ 3).

Jeigu nejudantį (rimties būsenos) kūną ima veikti jėga $\vec{F}$, tai jis pradeda judėti jėgos veikimo kryptimi (→ 3a). Kai dvi vienodo didumo jėgos veikia kūną priešingomis kryptimis (→ 3b), atstojamoji jėga lygi nuliui ir kūnas nejuda.

Pagaliau jeigu tą patį kūną veikia dvi nevienodo didumo jėgos $\vec{F_1}$ ir $\vec{F_2}$ (→ 3c), tai kūnas ima judėti atstojamosios jėgos veikimo kryptimi.

Iš šių pavyzdžių galima padaryti tokią išvadą: jeigu keletas jėgų veikia vieną kūną, tai jas galima pakeisti viena atstojamąja jėga.

Jėgos didumui matuoti naudojamas labai paprastas prietaisas — *dinamomètras*, turintis sugraduotą spyruoklę. Pastebėta, kad kuo didesnė jėga veikia spyruoklę, tuo didesnė yra jos deformacija ir tuo labiau ji pailgėja.

Kai spyruoklės sukurta jėga susilygina su veikiančia jėga, t. y. kai šių jėgų suma pasidaro lygi nuliui, spyruoklė atsiduria pusiausvyros padėtyje (→ 4). Dinamometras graduojamas prilyginant spyruoklės pailgėjimą atitinkamai jėgai.

Jėgos momentas

Jėgos momeñtas ($\vec{M}$) tam tikro taško atžvilgiu yra vektorius, statmenas plokštumai, kurioje yra tas taškas ir veikianti jėga. Jėgos momento vektoriaus ($\vec{M}$) kryptimi priimta laikyti kryptį, kuria slenka dešininis sraigtas, sukamas jėgos veikimo kryptimi. Jėgos momento modulis lygus jėgos ($\vec{F}$) modulio ir jos peties, t. y. trumpiausio nuotolio (d) nuo jėgos veikimo linijos iki sukimosi taško, sandaugai (→ 5).

Jėgos momentas svarbus tais atvejais, kai sistema sukasi apie kurį nors tašką ar apie ašį. Pavyzdžiui, jei tam tikra jėga paveikiama durų rankena, durys pasisuka apie savo ašį ($d \neq 0$), tuo tarpu jei ši jėga veikia taip, kad jos vektorius eina per durų sukimosi ašį, tai durys nepasisuka. Šiuo atveju $d = 0$ (→ 6).

Jėgų dvejetas

Dvi to paties didumo, bet priešingų krypčių jėgos, veikdamos kūną viena tiese, panaikina viena kitą. Jeigu toks kūnas nesideformuoja, sakome, kad jo neveikia jokia jėga. Tačiau kartais tos dvi jėgos gali veikti kūną ne viena tiese. Tuomet bet kurio taško atžvilgiu jos sukuria tokius jėgos momentus, kurių atstojamasis jėgos momentas yra statmenas jėgų dvejeto plokštumai ir nukreiptas to dvejeto sukamo dešininio sraigto slinkimo kryptimi. Atstojamojo jėgos momento modulis lygus atstumo tarp abiejų jėgų veikimo tiesių ir vienos jėgos modulio sandaugai. Jėgų dvejeto jėgos momentas yra toks pat bet kurio taško atžvilgiu.

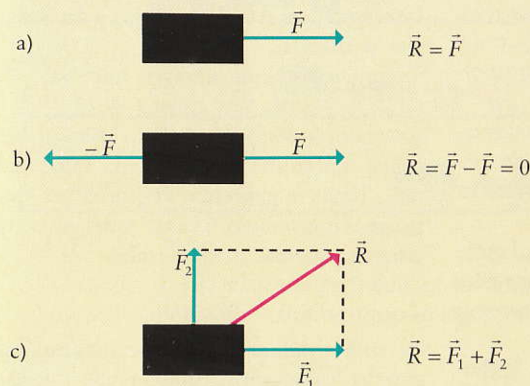
Dinamika nagrinėja kūnus veikiančių jėgų ir tų kūnų judėjimą apibūdinančių dydžių sąryšius. Pagrindiniai dinamikos dėsniai nusakomi Niutono dėsniais, kurie tiksliai apibūdina beveik visų fizikinių sistemų bei makroskopinių kūnų judėjimą. Tačiau tie

Jėga ir jėgos momentas



1. Jėgos, atsiradusios dėl raumenų įtempimo, pavyzdžiai

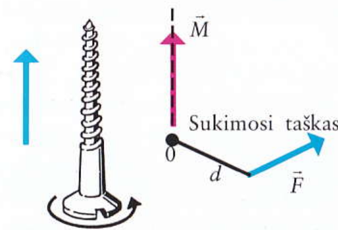
2. Raumenų įtempimas priešinasi sunkaus kūno kritimui



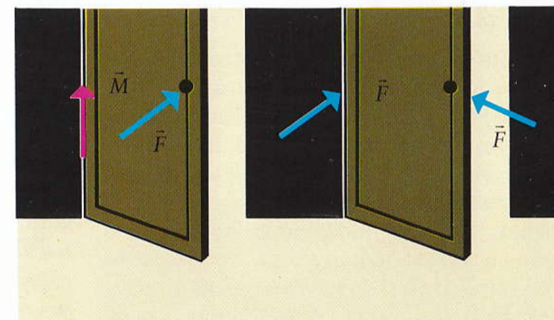
3. Jėgų sistemos; čia $\vec{R}$ — atstojamoji jėga



4. Jėgos didumo matavimas dinamometru



5. Jėgos veikimo kryptimi sukamo dešininio sraigto slinkimo kryptis rodo jėgos momento kryptį



6. Kai jėgos momentas nelygus nuliui, durys pasisuka apie savo ašį (kairėje), o kai lygus nuliui, nepasisuka (dešinėje)

dėsniai negalioja kūnams, judantiems dideliais greičiais ar mažais atstumais. Skirtumai, kurie šiais atvejais susidaro tarp numatomo ir egzistuojančio reiškinio, padėjo sukurti reliatyvumo ir kvantinės mechanikos teoriją.

Imkime ilgio matuoklį — metrinę liniuotę, laiko matuoklį — sekundmatį bei jėgos matuoklį — dinamometrą ir matuokime jėgą, reikalingą nedidelei transporto priemonei išjudinti (sekundmatis ir metrinė liniuotė skirti pagreičiui matuoti).

Bandymais galima nustatyti: kad ir kokia jėga veikia kūną, tos jėgos ir pagreičio santykis yra pastovus dydis. Padvigubinus jėgą, pagreitis taip pat padvigubėja (→ 1a), todėl galime sakyti, kad *pagreitis tiesiog proporcingas veikiančiai jėgai.*

Kadangi jėgos ir pagreičio santykis nekinta, tai aišku, kad jis nepriklauso nei nuo pagreičio, nei nuo jėgos. Šis santykis priklauso nuo kūno masės.

Bandymą pakartokime, uždėję ant judančio kūno krovinį. Šį kartą jėgos ir pagreičio santykis bus kitoks, tačiau ir vėl pastovus (→ 1b).

Jėgos ir pagreičio santykis yra dydis, apibūdinantis kūną (kūno masę), kurį veikia ta jėga. Šis santykis vadinamas kūno *inercine mase.*

Taigi gauname: $\frac{F}{a} = m$; čia F — kūną veikiančios jėgos modulis, a — kūno įgyto pagreičio modulis, m — to kūno masė. Iš dviejų tos pačios jėgos veikiamų kūnų mažesnį pagreitį įgyja tas, kurio masė didesnė. Inercinė masė yra pasipriešinimo, atsirandančio išjudinant kūną iš rimties būsenos arba keičiant jo judėjimą (judėjimo kryptį, judėjimo greitį ir kt.), matas.

Masės pirminis etalonas yra platinos ir iridžio ritinys, saugomas Tarptautiniame matų ir svarsčių biure Sevre (Prancūzija). Šio etalono masė maždaug lygi vieno litro 4 °C temperatūros distiliuoto vandens masei ir vadinama *kilogramù* (kg). Tūkstantoji kilogramo dalis yra *gramas* (g). Su minėtu pirminiu etalonu matavimo grandine susietas Lietuvos pamatinis masės etalonas, kuris saugomas Vilniaus metrologijos centre.

Niutono dėsniai

Remdamasis bandymais ir kitų tyrinėtojų, pavyzdžiui, G. Galilėjaus, gautais rezultatais, I. Niutonas (I. Newton) sukūrė iš esmės išsamų kūnų dinamikos aprašymą.

Pirmasis Niutòno dėsnis, dar vadinamas *inercijos dėsniu*, teigia: jeigu kūno neveikia kiti kūnai, tai jis išlaiko rimtį arba juda tiesiai ir tolygiai.

Trumpai jį galime užrašyti taip: jei $\vec{F} = 0$, tai $\vec{a} = 0$ arba $\vec{v}$ = const (→ 2).

Antrasis Niutòno dėsnis kokybiškai ir kiekybiškai apibūdina jėgos poveikį kūno judėjimui. Jėgos ir pagreičio vektoriai yra tiesiog proporcingi vienas kitam, todėl jų proporcingumą galima užrašyti taip:

$$\vec{F} = m\vec{a};$$

čia m — skaliarinis proporcingumo koeficientas, nusakantis kūno savybę (→ 3).

Trečiasis Niutòno dėsnis, dar vadinamas *veiksmo ir atoveikio dėsniu*, teigia, kad kiekvieną veiksmą visada lydi atoveikis ir atvirkščiai, taigi veiksmo ir atoveikio jėgos yra lygios, bet priešingų krypčių.

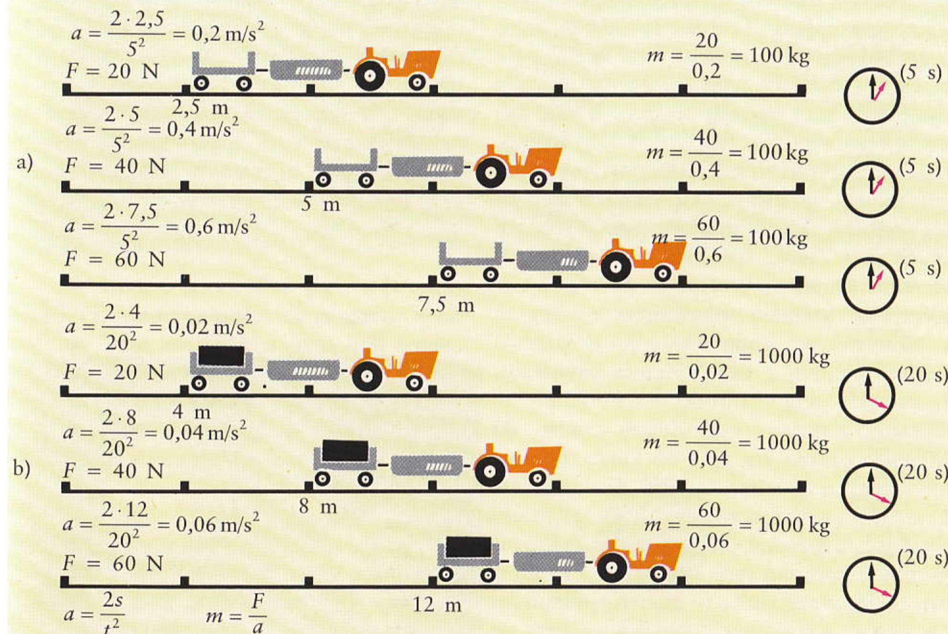
Matematinė šio dėsnio išraiška yra tokia:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}.$$

Jėga, veikianti golfo lazda smūgiuojamą kamuolėlį, lygi kamuolėlio jėgai, veikiančiai golfo lazdą, tačiau yra priešingos krypties (→ 4). Reikia atkreipti dėmesį į tai, kad atoveikio jėga nepanaikina veiksmo jėgos, nes šios jėgos veikia skirtingus kūnus.

SI sistemoje jėgos matavimo vienetas yra *niutònas* (N), t. y. jėga, kuri 1 kg masės kūnui suteikia 1 m/s² pagreitį.

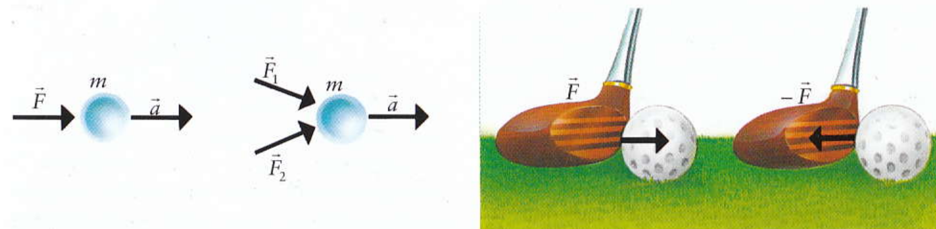
Jėga ir pagreitis



1. Dėl jėgos poveikio įgytas kūno pagreitis yra tiesiog proporcingas tai jėgai



2. Jei trintis neturėtų įtakos, kamuolėlis grįžtų į pradinę padėtį, kad ir koks būtų plokštumos polinkis. Jei tas polinkis būtų lygus nuliui, turėtume begalinį judėjimą



3. Pagreičio kryptis sutampa su atstojamosios jėgos, veikiančios kūną, kryptimi

4. Golfo lazdos jėga, veikianti kamuolėlį, ir kamuolėlio jėga, veikianti golfo lazdą, yra vienodo didumo, tačiau priešingų krypčių

Gravitacijos jėga

Visų laisvai krintančių kūnų pagreitis arti Žemės paviršiaus yra 9,8 m/s². I. Niutonas, nagrinėdamas gravitacijos problemą, darė prielaidą, kad tarp Žemės ir Mėnulio veikia jėga, kuri laiko Mėnulį orbitoje aplink Žemę ir yra tos pačios prigimties, kaip ir jėga, traukianti kūnus prie Žemės paviršiaus. Kitaip tariant, jis manė, kad Mėnulio įcentrinis pagreitis, kuris sudaro sąlygas Mėnuliui suktis apie Žemę, atsiranda dėl Žemės gravitacinės traukos (→ 1).

Įcentrinis Mėnulio pagreitis a_{ic}, pasak I. Niutono, yra daug mažesnis už laisvojo kritimo pagreitį g netoli Žemės paviršiaus. Jų santykis $a_{ic}/g = 1/3600 = 1/(60)^2$.

Kadangi atstumas nuo Žemės centro iki Mėnulio centro yra apie 60 kartų didesnis už nuotolį tarp kūno, esančio Žemės paviršiuje, ir Žemės centro, tai Niutonas priėjo išvadą, kad gravitacijos jėga atvirkščiai proporcinga nuotolio tarp dviejų kūnų kvadratui. Ši hipotezė tinka ir planetų judėjimui. *Gravitacijos jėga, kuria dvi dalelės arba du kūnai traukia vienas kitą, yra atvirkščiai proporcinga nuotolio tarp jų centrų kvadratui ir tiesiog proporcinga jų masės sandaugai.*

Kūnų matmenis laikant daug mažesniais už atstumą tarp kūnų, galima sakyti, kad tie kūnai yra taškiniai. Tuomet gravitacijos jėgos matematinė išraiška bus tokia:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2};$$

čia F — gravitacijos jėgos modulis, m_1 ir m_2 — kūnų, traukiančių vienas kitą, masė, r — atstumas tarp tų kūnų, G — gravitacijos konstanta, t. y. koeficientas, kurio skaitinė vertė priklauso tik nuo pasirinktos matavimo vienetų sistemos (→ 2).

Žemės gravitacijos jėga

Kai vienas iš sąveikaujančių kūnų yra Žemė, o kitas — labai mažas ir nedaug nutolęs nuo Žemės, tai tarp tų kūnų veikianti gravitacijos jėga vadinama kūno *sunkiu*, o trauka — *Žemės gravitacine trauka*. Anksčiau pateiktoje lygtyje m_1 yra Žemės masė ($m_1 = 5{,}97 \cdot 10^{24}$ kg). Pagal Niutono dėsnį, jėgą $\vec{F}$, veikiančią kūną, dalijant iš jo masės m_2, gaunamas kūno pagreitis, kuris žymimas raide g ir vadinamas *laisvojo kritimo*, arba *gravitacijos, pagreičiu*:

$$g = \frac{F}{m_2} = \frac{Gm_1}{r^2};$$

čia r — masės m_2 kūno atstumas iki Žemės centro (laikoma, kad Žemės masė m_1 centro atžvilgiu pasiskirsčiusi simetriškai).

Kai kūnas yra netoli Žemės paviršiaus, dydis r apytiksliai lygus Žemės spinduliui R, todėl laisvojo kritimo pagreitis virš Žemės paviršiaus

$$g_0 = \frac{Gm_1}{R^2};$$

jo skaitinė vertė apytiksliai lygi 9,8 m/s².

Dirbtinis Žemės palydovas sukasi apie Žemę spinduliu r. Jo sunkis yra įcentrinė jėga, kuri sukelia sukimąsi apskritimu, g yra įcentrinis pagreitis, lygus linijinio greičio kvadratui, padalytam iš orbitos spindulio: $g = v^2/r$ (→ 3, 4).

Tada

$$v = \sqrt{gr}.$$

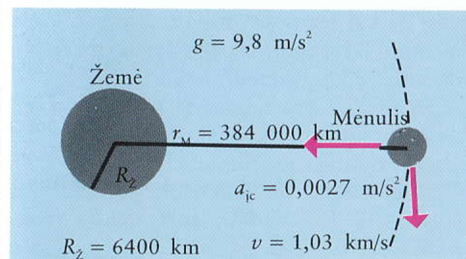
Taigi dirbtinio Žemės palydovo, kuris sukasi nedideliame aukštyje nuo Žemės paviršiaus ($r = R = 6400$ km; $g = 9{,}8$ m/s²), greitis yra 7,9 km/s.

Dalydami g lygtį iš g_0 lygties, gauname lygtį:

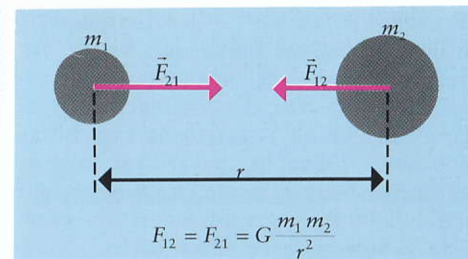
$$\frac{g}{g_0} = \frac{R^2}{r^2}.$$

Iš šio sąryšio matyti, kad laisvojo kritimo pagreitis yra atvirkščiai proporcingas kūno nuotolio nuo Žemės centro kvadratui. Todėl, pavyzdžiui, 6400 km aukštyje nuo Žemės paviršiaus kūnai sveria keturis kartus mažiau negu Žemės paviršiuje, o g lygus ketvirtadaliui 9,8 m/s² (→ 5, 6).

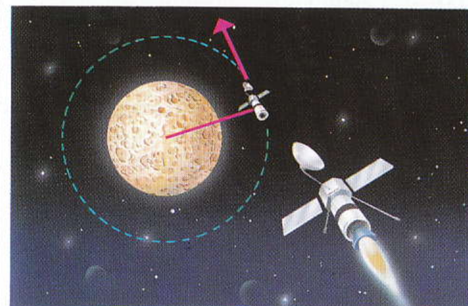
Gravitacijos laukas



1. Žemės gravitacinė trauka lemia Mėnulio įcentrinį pagreitį



2. Dviejų kūnų tarpusavio gravitacijos jėgos sudaro veiksmo ir atoveikio jėgų dvejetą



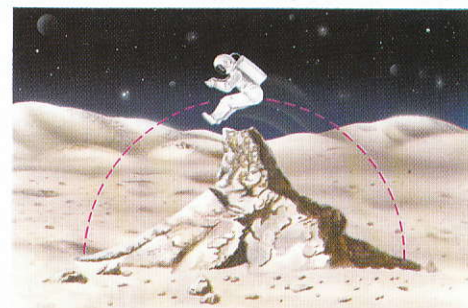
3. Raketos iškelia dirbtinius palydovus į numatytą orbitą ir tuo jų darbas pasibaigia; dirbtinis palydovas, judėdamas iš inercijos, išlieka orbitoje dėl gravitacijos jėgos veikimo



4. Kai dirbtinis palydovas, judėdamas orbitos liestine, pasiekia vietą, kurioje $v^2/r = g$, jis pradeda skrieti aplink Žemę ta orbita



5. Žemės gravitacijos jėgų laukas: raudonos rodyklės rodo gravitacijos lauko modulį ir kryptį Žemės paviršiuje, mėlynos rodyklės atitinka $3 \cdot 10^6$ m aukštį, žalios — $6 \cdot 10^6$ m aukštį virš Žemės paviršiaus



6. Jei Mėnulio masė lygi 1/6 Žemės masės ir gravitacijos jėga Mėnulio paviršiuje lygi 1/6 gravitacijos jėgos Žemės paviršiuje, tai, vienodai įtempę raumenis, Mėnulyje pašoksime 6 kartus aukščiau negu Žemėje

Darbas ir energija

„Energija“ ir „darbas“ — labai tarpusavyje susijusios sąvokos. Buityje jos visada yra greta (dažnai sakome „gerai pavalgyk ir turėsi energijos“ arba „kas turi energijos, padaro daug darbų“) ir tenkina tam tikrus mokslinius principus, pavyzdžiui, tokius: maisto produktų cheminė energija gali būti perduota biologinėms sistemoms arba energija suteikia galimybę atlikti darbą.

Darbas

Jeigu jėgos veikiamas kūnas pasislenka tam tikrą atstumą, sakome, kad atliekamas darbas. Jei kūnas stumiamas paviršiumi, kuris tam stūmimui priešinasi, tai nugalinti trintį ir paslenkanti kūną jėga atlieka darbą.

Darbas yra kūną iš išorės veikiančios jėgos ir kūno nueito kelio ilgio sandauga. Kai kūno judėjimo kryptis (→ 1) sutampa su tą kūną veikiančios jėgos $\vec{F}$ veikimo kryptimi, tai darbas A, kurį atlieka jėga $\vec{F}$, stumdama masės m kūną nuotolį s, yra:

$$A = Fs.$$

Jėga $\vec{F}$, kurios kryptis sudaro su judėjimo kryptimi kampą φ (→ 2), gali būti laikoma šių dviejų nepriklausomų jėgų (x ir y kryptimi) vektorine suma:

$$F_x = F \cos \varphi,$$
$$F_y = F \sin \varphi.$$

Jėgos F_x kryptis sutampa su kūno judėjimo kryptimi, todėl tos jėgos atliktas darbas $F_x s = Fs \cos \varphi$.

Kryptimi y kūnas nepasislenka, todėl jėga F_y darbo neatlieka. Darbą mes apibrėžiame taip: *darbas yra jėgos, veikiančios kūno judėjimo kryptimi, ir kelio, kurį nueina tos jėgos veikiamas kūnas, sandauga.*

Iš šio apibrėžimo galime padaryti tokias išvadas: 1) kai kūno nueitas kelias arba kūną veikianti jėga yra lygūs nuliui arba kai abu šie dydžiai yra statmeni vienas kitam, darbas lygus nuliui; 2) kai kūną veikiančios jėgos projekcijos kryptis sutampa su kūno judėjimo kryptimi, darbas yra teigiamas, kai minėtos kryptys priešingos, darbas neigiamas; 3) kai jėgos kryptis sutampa su kūno judėjimo kryptimi, darbas lygus tos jėgos modulio ir kūno nueito kelio sandaugai, be to, jo ženklas yra teigiamas (jeigu jėga veikia kūno judėjimo kryptimi) arba neigiamas (jeigu priešinga judėjimui kryptimi) (→ 3). SI sistemoje darbo matavimo vienetas yra *džaulis* (J). Tai *darbas, kurį atlieka vieno niutono* (1 N) *jėga, paslinkdama kūną savo veikimo kryptimi vieną metrą* (1 m).

Energija

Sakoma, kad kūnas ar kūnų sistema turi *energijos*, jeigu gali atlikti darbą. Pavyzdžiui, labai mažu greičiu važiuojantis automobilis (→ 4), atsitrenkęs į medinę tvorą, jos nesugadins, mat negalės atlikti darbo, kuris reikalingas tvoros pasipriešinimo jėgoms nugalėti. Tačiau važiuodamas didesniu greičiu, jis tą tvorą sulaužys — atliks darbą. Dėl savo greičio automobilis turi energijos, kuri susidūrimo su tvora metu virsta darbu.

Išnagrinėkime kitą paveikslą (→ 5), kuriame pavaizduotas nejudantis (rimties būsenos) kūnas. Veikiamas pastovaus didumo jėgos $\vec{F}$, tas kūnas ims judėti greitėdamas. Kai jis nueis kelią s, jo greitis bus lygus $v = at$ (į trinties jėgas nekreipiama dėmesio). To kūno nueito kelio ilgis lygus $s = \frac{1}{2}at^2$. Taigi

$$A = Fs = (ma)\left(\frac{1}{2}at^2\right) = \frac{1}{2}m(at)^2 = \frac{1}{2}mv^2.$$

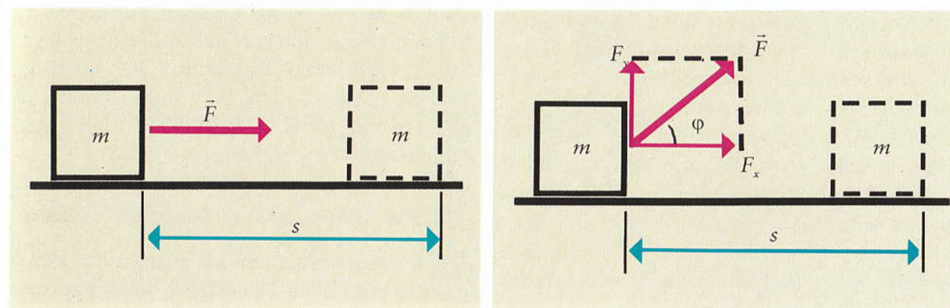
Šiuo atveju sakoma, kad kūnas įgijo energijos kiekį, lygų $\frac{1}{2}mv^2$.

Energija, kurios turi judantis kūnas, vadinama *kinetine energija*. Ji priklauso ne tik nuo kūno greičio, bet ir nuo jo masės.

Kinetinė energija yra didžiausias darbas, kurį gali atlikti judantis kūnas. Dėl darbo, reikalingo pasipriešinimo jėgoms įveikti, kūno kinetinė energija mažėja.

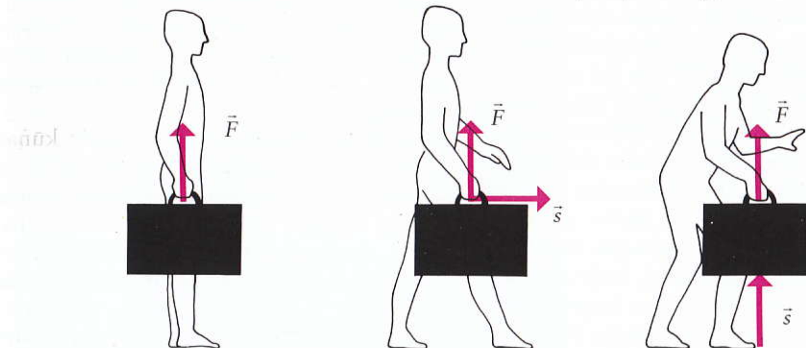
Panagrinėkime kitą atvejį. Jeigu judantį kūną veikia jėga, kuri didina to kūno greitį, tai jos atliktas darbas lygus kūno kinetinės energijos prieaugiui (*kinetinės energijos teorema*).

Darbas ir kinetinės energijos teorema



1. Jei kūno judėjimo kryptis sutampa su jėgos veikimo kryptimi, tai darbas A apskaičiuojamas taip: $A = Fs$

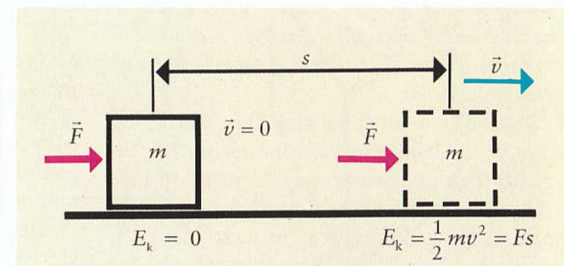
2. Jei kūno judėjimo kryptis nesutampa su jėgos veikimo kryptimi, tai darbą atlieka tik jėga F_x, kurios kryptis sutampa su kūno judėjimo kryptimi: $A = Fs \cos \varphi$



3. Kuris iš jų atlieka darbą? Pirmasis žmogus darbo neatlieka, nes nekilnoja lagamino. Antrasis žmogus taip pat neatlieka darbo, nes jėgos veikimo kryptis yra statmena kūno judėjimo krypčiai. Darbą atlieka tik trečiasis žmogus, mat kūną veikianti jėga paslenka jį ta pačia kryptimi



4. Judėdamas pakankamai dideliu greičiu, automobilis nugali tvoros pasipriešinimo jėgas



5. Rimties būsenos kūnas, paveiktas jėgos, pasislenka jos veikimo kryptimi. Atliktas darbas lygus kūno įgytai kinetinei energijai: $A = Fs = mv^2/2$

Jei rimties būsenos kūnas, kurio masė m, bus pakeltas į aukštį h ir ten paliktas rimties būsenos (→ 1), tai tokiu veiksmu, nekeičiančiu kūno greičio, įveikiant gravitacijos jėgą, bus atliktas tam tikras darbas. Kūnas neįgis kinetinės energijos, jis tik turės energijos, kurią nusako kūno buvimo vieta. Jeigu iš aukščio h kūnui leisime kristi, tai ši energija virs kinetine energija.

Kiekvienas kūnas Žemės gravitacijos lauke turi *potencinės energijos*: darbas, atliktas įveikiant gravitacijos jėgą, sukaupiamas ir saugomas potencinės energijos pavidalu (→ 2).

Kitame paveiksle (→ 4) parodyta, kaip kinetinė energija virsta potencine ir atvirkščiai. Masės m kūnas be trinties slysta pastoviu greičiu v_0 horizontalia plokštuma ir susiduria su spyruokle. Ši tuoj pat ima veikti kūną, mažindama jo greitį. Jėga, kuria spyruoklė veikia kūną, yra nepastovi, ji apytiksliai proporcinga spyruoklės deformacijai x (*Huko dėsnis*). Kūno kinetinė energija pradeda mažėti ir, kai jo greitis prilygsta nuliui, o spyruoklė suspaudžiama labiausiai ($x = d$), pasidaro lygi nuliui. Šioje padėtyje visa kūno energija suvokiama kaip suspaustos spyruoklės potencinė energija. Po to kūnas ima judėti priešinga kryptimi. Nuo spyruoklės jis atsiskiria turėdamas greitį v_0 ir vėl įgydamas pradinį kinetinės energijos kiekį: visa energija, kuri buvo suvartota spyruoklei suspausti, atgaunama. Taigi *visa mechaninė kūno energija, kuri lygi kinetinės ir potencinės energijos sumai, proceso metu išlieka nepakitusi.*

Tokį rezultatą gausime kiekvieną kartą, kai kūną veiks *konservatyviosios jėgos*. Būdingas šių jėgų požymis yra tas, kad jų atliktas darbas priklauso tik nuo pradinės ir galinės kūno padėties (bet ne nuo proceso metu kūno nueito kelio). Konservatyviosios jėgos pavyzdys gali būti gravitacijos jėga (→ 3), taip pat spyruoklės suspaudimo jėga (→ 4). Kai kūną veikia, pavyzdžiui, trinties jėga, mechaninė energija neišsilaiko, mat dėl trinties jėgos įtakos darbas, atliktas kūnui judant iš vienos vietos į kitą ir vėl grįžtant į pradinį tašką, nelygus nuliui. Trinties jėgos visada priešinasi judėjimui. Jei judėjimo kryptis pasikeičia, tai pakinta ir trinties jėgos kryptis, todėl trinties jėgų atliktas darbas visada yra neigiamas (→ 5).

Jėgos impulsas ir judesio kiekis

Jeigu masės m kūną veikia jėga, tai tas kūnas juda su pagreičiu. Kuo ilgesnį laiką pagreitis yra nelygus nuliui, tuo labiau pakinta greitis. Taigi kalbame apie dydį, nusakomą ne tik jėga, bet ir laiko tarpu, per kurį kūnas juda turėdamas pagreitį, t. y. per kurį jėga nelygi nuliui. Šis dydis vadinamas *jėgos impulsu*. Tai yra vektorinis dydis. Jo kryptis sutampa su jėgos veikimo kryptimi, o modulis lygus jėgos $\vec{F}$ modulio ir jos veikimo trukmės Δt sandaugai, t. y. $F\Delta t$.

Jei į žmogų atsitrenkia 30 g masės kūnas, judantis 1 m/s greičiu, žmogus gali ir nepajusti to smūgio. Tačiau susidūrimo rezultatas bus visiškai kitoks, kai į žmogų atsitrenks tuo pačiu greičiu (1 m/s) judantis daug didesnės masės kūnas (pavyzdžiui, automobilis).

Taigi judančio kūno masė turi didelę reikšmę galutiniam rezultatui.

Antra vertus, svarbus ir greitis: netgi nedidelės masės kulka, lėkdama 400 m/s greičiu, gali sužaloti žmogų.

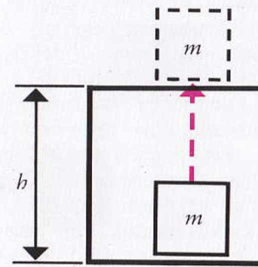
Kūno *judesio kiekį* apibrėžiame kaip vektorių, kurio kryptis sutampa su greičio kryptimi, o modulis lygus kūno masės m ir jo greičio $\vec{v}$ modulio sandaugai. Taigi $\vec{p} = m\vec{v}$.

Sakykime, jėgos $\vec{F}$ veikiamas kūnas įgyja pagreitį $\vec{a}$. Tuomet kūno greitis per jėgos veikimo trukmę Δt pakis dydžiu $\vec{a}\Delta t$. Pagal Niutono dėsnį, tai sukels kūno judesio kiekio pokytį

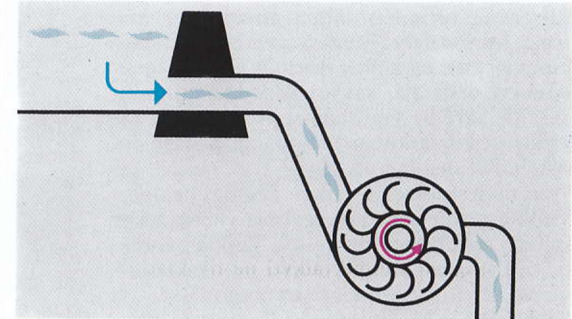
$$m\Delta\vec{v} = m\vec{a}\Delta t = \vec{F}\Delta t.$$

Taigi kūną veikiančios jėgos impulsas $\vec{F}\Delta t$ sukelia to kūno judesio kiekio pokytį $m\Delta\vec{v}$.

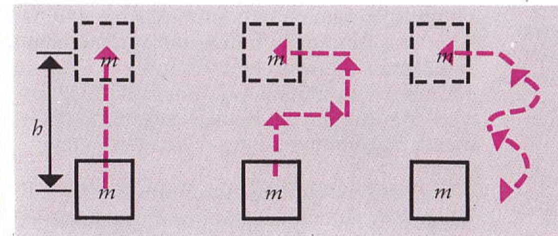
Darbas ir potencinė energija



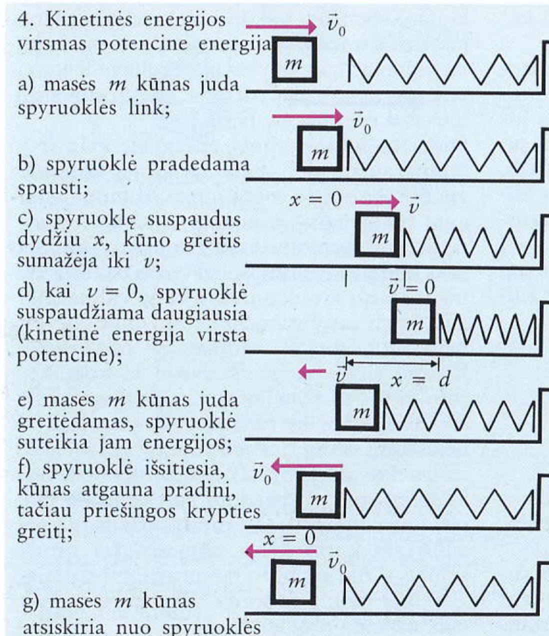
1. Į aukštį h pakeltas kūnas turi potencinės energijos, kuri lygi mgh

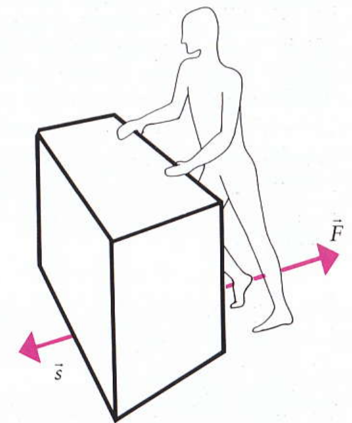


2. Krisdamas žemyn, vanduo atlieka darbą, nes turi potencinės energijos



3. Darbas, atliktas keliant masės m kūną į aukštį h, lygus mgh ir nepriklauso nuo kūno judėjimo trajektorijos





5. Trinties jėgos priešinasi kūno judėjimui (šiuo atveju jų darbas yra neigiamas)

Judesio kiekio tvermė

Sakykime, turime uždarąją sistemą, t. y. sistemą, kurios dalys (kūnai) sąveikauja tik tarpusavyje, neveikiamos išorinių jėgų (sistema laikoma uždarąja, kai jos sudedamųjų dalių abipusė sąveika yra daug stipresnė už jų sąveiką su kitais kūnais). Kadangi uždarojoje sistemoje atstojamoji jėga $\vec{F}$ lygi nuliui, tai visas judesio kiekis laikui bėgant nekinta. Vadinasi, toje sistemoje galioja vadinamasis *judesio kiekio tvermės dėsnis.* Reikia pabrėžti, kad šį dėsnį galima taikyti ne tik klasikinėms, bet ir kvantinėms sistemoms.

Paveiksle (→ 1) pavaizduoti du rimties būsenos kūnai, sujungti suspausta spyruokle. Neatsižvelgdami į trinties jėgą ir spyruoklės masę, galime teigti, kad visas sistemos judesio kiekis lygus nuliui. Kadangi sistema yra uždara, tai, pagal judesio kiekio tvermės dėsnį, bet kaip sąveikaujant kūnams, sistemos judesio kiekis nepakis — jis išliks lygus nuliui. Išsitiesiant spyruoklei, kūnai tols vienas nuo kito greičiu $\vec{v}_1$ ir $\vec{v}_2$, taigi bus

$$0 = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 .$$

Iš čia išplaukia, kad

$$m_1\vec{v}_1 = -m_2\vec{v}_2 .$$

Minuso ženklas šioje lygtyje rodo, kad kūnų greičių kryptys yra priešingos.

Išnagrinėkime kitą atvejį (→ 2). Paleidžiant iš šautuvo kulką, sistemos (šautuvo ir kulkos) neveikia išorinės jėgos, todėl visas jos judesio kiekis nekinta. Prieš šūvį judesio kiekis $\vec{p}$ buvo lygus nuliui, nes ir šautuvas, ir kulka nejudėjo. Po šūvio taip pat turi būti $\vec{p} = 0$. Kulkos judesio kiekis $m\vec{v}$ nukreiptas į priekį, tuo tarpu šautuvo $M\vec{V}$ — į priešingą pusę (atgal), be to, jis yra to paties didumo, kaip kulkos judesio kiekis. Taigi šautuvas slenka atgal greičiu

$$V = \frac{mv}{M};$$

čia m — kulkos masė, v — kulkos greitis, M — šautuvo masė.

Neutrino atradimas

Vienas didžiausių atradimų, padarytų taikant judesio kiekio tvermės dėsnį, yra elementariosios dalelės — *neutrino* — atradimas.

Kai kurioms medžiagoms (kaip netrukus sužinosime) būdingas natūralus radioaktyvumas. Pavyzdžiui, anglies izotopo $^{14}_{6}C$ branduolys, išspinduliavęs beta dalelę, virsta azoto izotopo $^{14}_{7}N$ branduoliu (→ 3).

Beta skilimas susijęs su vieno branduolio neutrono virtimu protonu. Vykstant šiam virsmui, išsilaisvina *elektronas* (elektronų srautas vadinamas beta spinduliais).

Kadangi iš pradžių nejudėjęs branduolys skildamas išmeta elektroną, kuris įgyja tam tikrą judesio kiekį $\vec{p}_e$, tai, pagal judesio kiekio tvermės dėsnį, transformuotas branduolys turi judėti priešinga kryptimi negu elektronas ir jo judesio kiekio modulis turi būti lygus elektrono judesio kiekio moduliui. Tačiau iš tikrųjų taip nėra (→ 4). Šveicarijos fizikas V. Paulis (W. Pauli), remdamasis judesio kiekio tvermės dėsniu, 1930 m. iškėlė hipotezę, kad egzistuoja dar viena elementarioji dalelė — *neutrinas*. Beta skilimo metu ji išspinduliuojama kartu su elektronu (→ 5). Anot šios hipotezės, būtent naujoji dalelė turi trūkstamą judesio kiekį ir energiją.

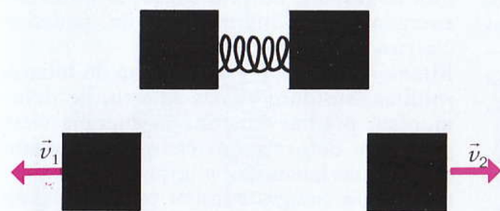
1956 m. mokslininkai K. L. Kauenas (C. L. Cowan) ir F. Reinsas (F. Reines) daugeliu eksperimentų pademonstravo neutrino egzistavimą.

Tamprusis ir netamprusis smūgis

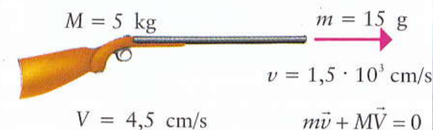
Uždarojoje sistemoje susidūrus dviem kūnams, visos sistemos judesio kiekis ir energija nepakinta. Kiekvienas tų kūnų, be kinetinės energijos, turi dar ir *vidinės energijos*, kuri yra tą kūną sudarančių atomų bei molekulių judėjimo ir tarpusavio sąveikos energija. Uždarosios sistemos visa energija yra tvari.

Didėjant kūno vidinei energijai, kyla ir jo temperatūra. Jei dalis to kūno kinetinės energijos smūgio metu virsta šilumine energija, tai smūgis vadinamas *netampriuoju*. Apskritai netampriuoju smūgiu laikomas toks kūnų susidūrimas, dėl kurio pakinta vieno ar abiejų sąveikaujančių kūnų vidinė energija. Jeigu susiduriančių kūnų vidinė energija nepakinta, smūgis vadinamas *tampriuoju*. Įtempę siūlą, vieną iš dviejų svyruojančių rutulių (→ 6) pakelkime ir paleiskime. Krisdamas žemyn, šis rutulys atsitrenks į antrą, nejudantį, rutulį. Jei abu rutuliai yra vienodi, tai po smūgio pirmasis sustos, nes visą savo kinetinę energiją perduos antrajam. Po tampriojo smūgio antrasis rutulys pakils į tą patį aukštį, iš kurio krito pirmasis. Jei rutulių smūgis iš tikrųjų būtų tamprusis, tai sistemos visa mechaninė energija liktų tvari, o vyksmas niekada nesibaigtų.

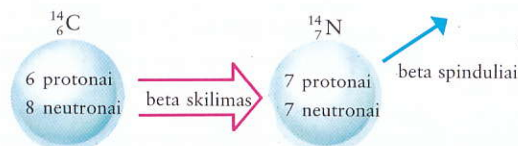
Judesio kiekio tvermė



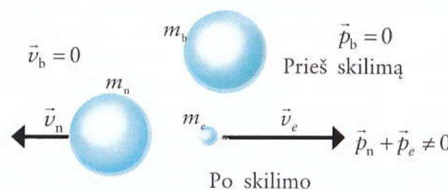
1. Šių dviejų kūnų greičiai susieti judesio kiekio tvermės dėsniu



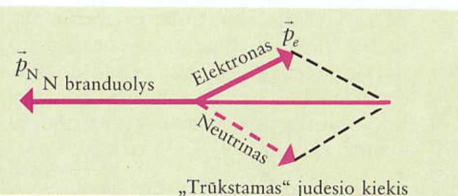
2. Šautuvas ir kulka sudaro uždarąją sistemą. Po šūvio jų judesio kiekis bus vienodo didumo, bet priešingų krypčių



3. Anglies izotopo $^{14}_{6}C$ branduolio beta skilimas

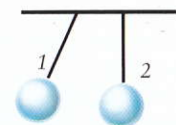


4. Atomo branduolys yra uždaroji sistema. Vykstant beta skilimui, branduolys, išmetęs elektroną, turėtų įgyti judesio kiekį, kurio modulis lygus elektrono judesio kiekio moduliui, o kryptis priešinga...

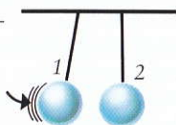


5. ... iš tikrųjų elektrono ir branduolio judesio kiekiai yra ne toje pačioje tiesėje. Vis dėlto pilnutinis judesio kiekis turi būti lygus nuliui. Taigi branduolys išspinduliuoja dar vieną dalelę — neutriną

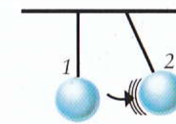
a) Pradinė padėtis;



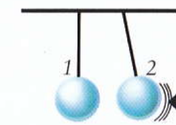
b) *1* rutulys smūgiuoja į *2* rutulį;



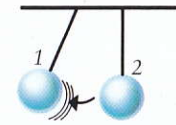
c) *1* rutulys sustoja, o *2* rutulys pradeda tolti nuo pirmojo;



d) judėjimo kryptis pasikeičia; *2* rutulys smūgiuoja į *1* rutulį;



e) *1* rutulys atsiduria pradinėje padėtyje



6. Kai neveikia trinties jėgos, du rutuliai svyruoja be galo ilgai

Tamprumas

Kad kūnas deformuotųsi, jį reikia veikti atitinkamo didumo jėga. Nustojus veikti jėgai, kūnas atgauna pradinę formą. Toks kūnas vadinamas *tampriuoju*, o jo deformacija — *tampriąja*. Kūno *tamprioji deformacija yra tiesiog proporcinga kūną veikiančiai jėgai*. Tai — Huko dėsnis.

Iš tikrųjų kūnai nėra visiškai tamprūs. Persvėrusi tam tikrą vertę, t. y. *tamprumo ribą*, deformacija nustoja būti tiesiog proporcinga jėgai. Tuomet dėl jėgos poveikio atsiranda liktinė kūno deformacija. Didėjant deformuojančiai jėgai, pasiekiama *stiprumo riba*, kurią peržengus tempiama medžiaga suyra.

Huko dėsnis galioja tik tada, kai deformacija maža. Sakykime, F yra poveikis (pavyzdžiui, tempimo jėga), sukeliantis kūno deformaciją, o x — kūno ilgio pokytis. Tada Huko dėsnį galime išreikšti formule $F = kx$; čia k — proporcingumo koeficientas, priklausantis nuo deformuojamo kūno savybių (→ 1).

Pagal veiksmo ir atoveikio dėsnį, kūnas priešinasi jį deformuojančiai jėgai tokio paties didumo, bet priešingos krypties jėga, kitaip tariant, deformuojamas kūnas sukuria tamprumo jėgą.

Deformuojančioji jėga, slėgdama atitinkamą kūno vietą, atlieka darbą. Jeigu kūnas yra tamprus, šis darbas sukaupiamas tame kūne kaip potencinė deformacijos energija. Vėliau, kūnui atgaunant pradinę formą, potencinė deformacijos energija naudojama darbui atlikti.

Vienas iš tampriosios deformacijos pavyzdžių yra masės m kūno suspausta spyruoklė, kuri sukaupia mechaninę energiją.

Kai deformuojamas kūnas pailgėja dydžiu x, deformaciją sukėlusios jėgos modulis pakinta nuo 0 iki kx. Vidutinė jo vertė (vidurkis) lygi $\frac{kx}{2}$. Šią vidutinę jėgą dauginant iš kūno ilgio pokyčio x, galima apskaičiuoti jėgos atliktą darbą. Jis lygus $\frac{kx^2}{2}$. Tai yra potencinė deformacijos energija, kurią sukaupia dydžiu x pailgėjęs kūnas.

Išnagrinėkime konkrečius pavyzdžius. Paveiksle (→ 2) pavaizduotas atvykstančio traukinio smūgis į buferį, turintį viduje spyruoklę. Deformuojantis šiai spyruoklei, traukinio kinetinė energija virsta potencine energija, kurią sukaupia spyruoklė. Traukiniui išvykstant, buferio sukaupta potencinė energija virsta kinetine energija, padedančia jam atsiskirti nuo buferio.

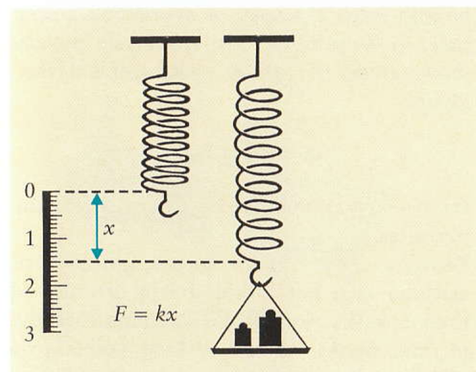
Kitame paveiksle (→ 3) matome du biliardo rutulius. Susidūrę vienas su kitu, jie deformuojasi, pradinė kinetinė jų energija virsta potencine deformacijos energija. Rutuliams susispaudus labiausiai, ji įgyja didžiausią vertę. Kai po smūgio rutuliai pradeda atgauti pradinę formą, deformacijos energija ima mažėti ir pagaliau vėl virsta kinetine energija. Rutulių deformacijos potencinė energija pasidaro lygi nuliui, ir rutuliai, atsiskyrę vienas nuo kito, lekia į priešingas puses, turėdami pastovią kinetinę energiją.

Svyravimai (virpesiai)

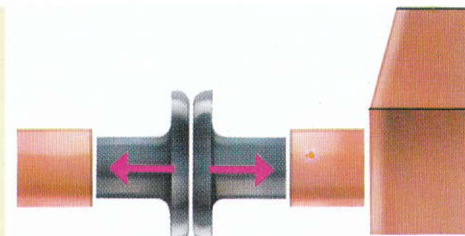
Vieną plieninio strypo galą (A) įtvirtinkime (→ 4), o kitą, laisvąjį, galą B patraukime į šoną nuo pusiausvyros padėties. Jį paleidus, strypas pradės svyruoti (virpėti). Galą B traukiant iš pusiausvyros padėties, strypas deformuojasi ir įgyja potencinės deformacijos energijos. Dėl deformacijos jame atsiranda tamprumo jėgos, kurios verčia paleistą strypą iš pradinės padėties grįžti į pusiausvyros padėtį. Taigi strypo potencinė deformacijos energija virsta jo kinetine energija.

Grįžusio į pusiausvyros padėtį strypo potencinė deformacijos energija lygi nuliui, o kinetinė energija yra didžiausia. Ji lygi potencinei energijai, kuri iš pradžių buvo suteikta lenkiamam strypui. Atsidūręs pusiausvyros padėtyje, strypas čia nesustoja. Iš inercijos jis svyra toliau ir vėl deformuojasi. Jei nebūtų trinties, strypo galas B nukryptų į priešingą pusę simetriškai pradinei jo padėčiai ir galiniame taške jo greitis pasidarytų lygus nuliui. Potencinė energija šioje padėtyje susilygintų su pradine potencine deformacijos energija. Strypo bet kurio taško poslinkį nuo pusiausvyros padėties pažymėkime raide x. Tada to taško potencinė deformacijos energija bus lygi $\frac{kx^2}{2}$. Kai strypas nukryps į priešingą pusę nuo pusiausvyros padėties (paveiksle ji atitinka 6) atvejį), to paties taško poslinkis bus lygus $-x$, o potencinė energija susilygins su pradine.

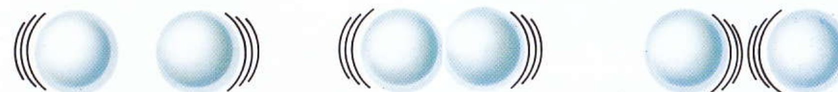
Tamprioji deformacija



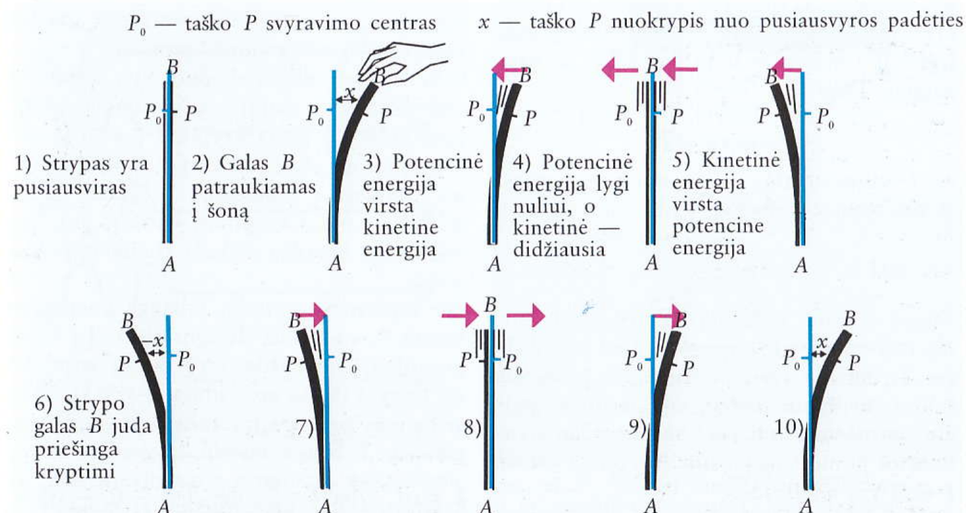
1. Spyruoklės deformacija reiškiasi jos ilgio x kitimu: spyruoklės ilgio pokytis yra tiesiog proporcingas jėgai, kuria svarsčiai veikia spyruoklę



2. Traukinys atsitrenkia į buferį ... traukinio kinetinė energija virsta buferio spyruoklės potencine deformacijos energija ... traukinys sustoja



3. Dviejų biliardo rutulių kinetinė energija smūgio metu virsta potencine jų deformacijos energija, o po smūgio — kinetine energija, ir rutuliai tolsta vienas nuo kito



4. Idealiai tampraus plieninio strypo svyravimas

Kiekvieną strypo tašką veikia jėga, nukreipta į pusiausvyros padėties tašką, kuris dar vadinamas *svyravimo centru*. Ta jėga kiekvieną akimirką yra tiesiog proporcinga strypo taško nuotoliui iki svyravimo centro. Minėtas nuotolis vadinamas *nuokrypiu*. Didžiausias taško nuokrypis vadinamas *svyravimo amplitude*. Tai atstumas, kuriuo nutolsta nuo svyravimo centro taškas, kai akimirkinis jo greitis pasidaro lygus nuliui. Laikas, per kurį tas taškas susvyruoja vieną kartą, vadinamas *svyravimo periodu*, o nagrinėjamas svyravimas — *paprastuoju harmoniniu svyravimu*.

Svyravimo dažnis — tai svyravimų skaičius per vienetinį laiką. Jis yra atvirkščiai proporcingas svyravimo periodui. Dažnis paprastai matuojamas *hercais* (Hz): 1 Hz = 1 s^{-1}. Dažnio matavimo vienetas taip pavadintas pagerbiant vokiečių fiziką H. Hercą (H. Hertz).

Paveiksle (→ 1) pavaizduotas masės m kūnas, padėtas ant paviršiaus ir sujungtas su sraigtine spyruokle. Trinties tarp kūno ir paviršiaus nėra. Kūną patraukus iš jo pusiausvyros padėties, spyruoklė sukuria traukos jėgą, lygią $\vec{F} = -k\vec{x}$ (minuso ženklas rodo, kad jėgos kryptis yra priešinga poslinkio krypčiai). Pagal antrąjį Niutono dėsnį, jėga lygi kūno masės m ir jo pagreičio $\vec{a}$ sandaugai. Taigi

$$\vec{F} = m\vec{a} = -k\vec{x};$$

čia k — spyruoklės tamprumo koeficientas. Iš šios lygties išplaukia, kad

$$\vec{a} = -\frac{k}{m}\vec{x}.$$

Masės m kūno judėjimą laikui bėgant galima registruoti taip, kaip parodyta paveiksle (→ 1). Su kūnu tvirtai sujungtas pieštukas brėžia svyravimo kreivę ant pastoviu greičiu statmenai kūno judėjimo krypčiai slenkančios popieriaus juostos. Brėžiama kreivė (→ 2) yra sinusoidė:

$$x(t) = X \sin(\omega t + \varphi).$$

Ji išreiškia kūno nuokrypio x priklausomybę nuo laiko t. Čia X — svyravimo amplitudė, φ — pradinė fazė (paveiksle pavaizduotu atveju $\varphi = 0$), ω — kampinis dažnis. Dydis

$$\omega = 2\pi f = 2\frac{\pi}{T};$$

čia f — svyravimo dažnis, T — svyravimo periodas.

Periodas T yra laiko tarpas, atitinkantis atstumą tarp bet kokių dviejų artimiausių kreivės taškų, kurių fazės sutampa. Įrodyta, kad masės m taško, kurį veikia jėga $\vec{F} = -k\vec{x}$, paprastojo harmoninio svyravimo periodas lygus

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

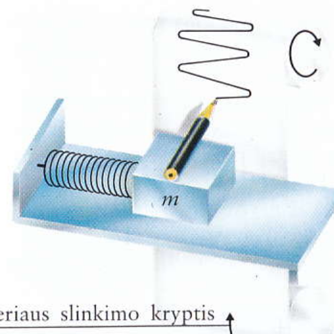
Bangavimas

Dalelių sąveikos išraiška yra ir reiškinys, vadinamas *bangavimu*. Kaip pavyzdį imkime ištiestą virvę (→ 3). Jei vieną jos galą priversime svyruoti aukštyn žemyn, tai svyravimas sklis išilgai visos virvės. Šiame pavyzdyje energija bus perduodama *skersinėmis bangomis*, kurios plinta statmena atskirų virvės taškų svyravimui kryptimi.

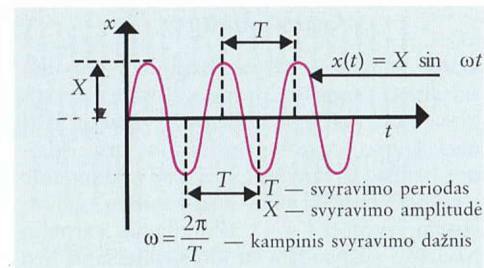
Cilindre periodiškai slankiojantis stūmoklis suslegia prieš jį esantį orą, versdamas jo daleles judėti ta pačia kryptimi (→ 4). Kiekvienas to oro sluoksnis turi didesnį slėgį negu tolimesnis sluoksnis. Slėgimo banga sklinda ta pačia kryptimi, kuria ir juda dalelės, taigi energija sklinda *išilginėmis bangomis*.

Per svyravimo periodą T banga nueina atstumą λ, vadinamą *bangos ilgiu*. Jis lygus nuotoliui, pavyzdžiui, tarp dviejų artimiausių bangos iškylų arba įdubų (→ 5). Kadangi bangos ilgis yra nuotolis, kurį per vieną periodą T banga nusklinda greičiu v, tai $\lambda = vT$, arba $\lambda = \frac{v}{f}$, nes $T = \frac{1}{f}$ (f — svyravimo dažnis).

Svyravimai ir bangos

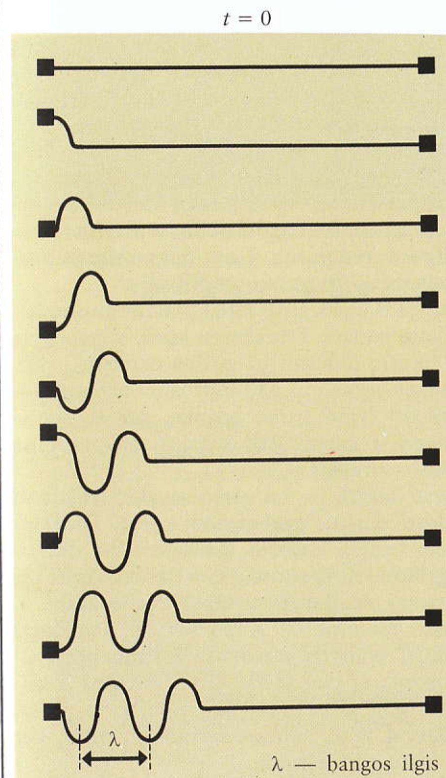


1. Prie kūno pritvirtintas pieštukas brėžia svyravimo kreivę

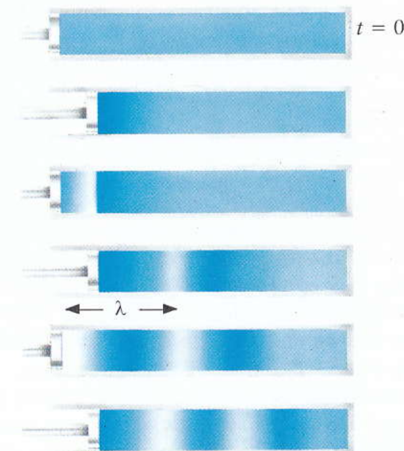


2. Harmoninio svyravimo diagrama

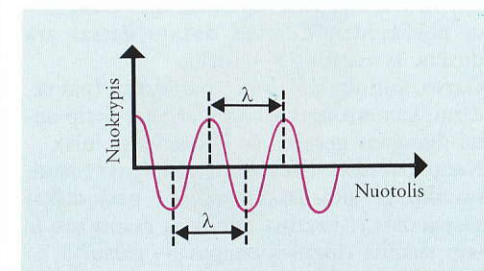
$t = 0$



3. Skersinės bangos prigimtis: pakaitomis kilnojant ir nuleidinėjant žemyn vieną virvės galą, svyravimas sklinda horizontalia kryptimi



4. Cilindre esančio stūmoklio periodinis judėjimas sukelia išilgines bangas



5. Per vieną periodą banga nusklinda atstumą, lygų bangos ilgiui λ

Akustika

Garso bangos

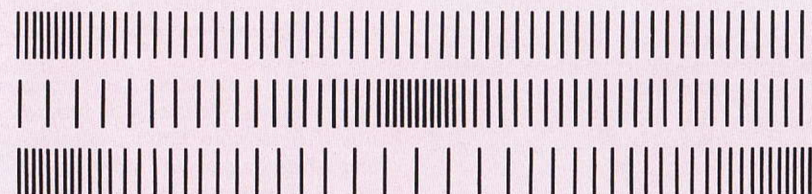
Garso bangos — tai mechaninio svyravimo sklidimas tamprioje terpėje. Jos yra ne kas kita, kaip tos terpės slėgio ir tankio kitimas. Garso bangos priskiriamos prie išilginių bangų. Įsivaizduokime, kad suduodame į varpelį ar kokį nors kitą paviršių, galintį laisvai svyruoti (→ 1). Išlinkdamas varpelio paviršius suspaudžia su juo susiliečiantį oro sluoksnį. Šis savo ruožtu paveikia greta jo esantį kitą oro sluoksnį, ir taip generuojama pirmoji garso banga.
Netrukus varpelio paviršius dėl savo tamprumo išlinksta į kitą pusę, o su juo susiliečiantis oro sluoksnis išretėja. Tuo tarpu pirmoji banga laisvai sklinda toliau. Oro sluoksnis, esantis prie varpelio paviršiaus, periodiškai suslegiamas ir taip sukeliamos naujos bangos. Tas pats vyksta prie garsiakalbio membranos paviršiaus, svyruojančio dažniu f (t. y. f kartų per sekundę). Greta membranos esančios oro dalelės suspaudžiamos ir išretinamos pusiausvyros padėties atžvilgiu taip pat dažniu f, bangos sklidimo kryptis sutampa su membranos svyravimo kryptimi. Pasiekusios žmogaus ausį, šios bangos joje tai suslegia, tai išretina orą (taip pat f kartų per sekundę). Tas oras virpina ausies būgnelį, drauge perduodamas svyravimą į ausies vidų. Jei tokio svyravimo dažnis f yra nuo 16 Hz iki 20 000 Hz, tai garsas išgirstamas.
Nurodytos ribinės garso dažnių vertės yra apytikslės, mat kiekvienas žmogus garsą girdi nevienodai. Žemojo dažnio garsas yra duslus, o aukštojo — aštrus.
Garso šaltinis gali būti *paprastas* (pavyzdžiui, kamertonas) arba *sudėtingas* (kaip antai žmogaus gerklos su balso klostėmis).
Netgi paprasta ištempta styga (pavyzdžiui, smuiko ar gitaros) virpėdama periodiškai suspaudžia ir išretina aplink ją esantį orą ir taip sukelia išilgines bangas — garsą.
Paveiksle (→ 2) pavaizduoti žmogaus ir kai kurių muzikos instrumentų sukeliamų garsų dažnio intervalai. Čia dažnis didėja iš kairės į dešinę.

Kamertonu vadinamas prietaisas, kurio visų taškų svyravimas yra *paprastasis harmoninis*, taigi kamertonas sukuria vieno dažnio virpesį. Harmoningai svyruoja netgi jį supančios erdvės taškai. Kamertono sukeliamas garsas vadinamas *grynuoju*. Kitų sistemų kuriamas garsas yra *sudėtinis*, t. y. sudarytas iš grynųjų garsų, kurių dažnis yra vieno grynojo garso *kartotinis*.
Žemiausias garsas vadinamas *pagrindiniu tonu*, o jo kartotinis — *virštoniu*.

Garso savybės

Garsas apibūdinamas trimis dydžiais: *stipriu*, *aukščiu* ir *tembru*.
Pagal *garso stiprį* atskiriame stiprų garsą nuo silpno. Garso stipris — tai dydis, nusakantis energijos kiekį, kurį garso banga per vienetinį laiką perneša pro vienetinį paviršių, statmeną bangos sklidimo krypčiai. Garso stiprio matavimo vienetas yra vatas kvadratiniam metrui (W/m^2). Kai garso banga perneša labai didelę energiją, garsas yra nepaprastai stiprus. Įrodyta, kad ši energija tiesiog proporcinga dalelių svyravimo amplitudės kvadratui. Taigi garso stipris priklauso nuo to garso amplitudės.
Žmogaus ausis girdi labai plataus stiprio intervalo garsus. Triukšmas, kurio stipris apie 10^{12} kartų didesnis už girdos slenkstį (→ 4), klausos organams gali būti labai nemalonus. Virš šio lygio garso jutimas darosi skausmingas ir garsas gali sužaloti neapsaugotą klausos organą.
Garso aukštis — tai garso savybė, leidžianti atskirti duslius garsus nuo aštrių. Didėjant garso bangos dažniui, garso aukštis didėja. Pagrindinį toną atitinka tam tikras dažnis. Du skirtingi muzikiniai garsai skiriasi aukščiu.
Garso tembras — garso savybė, leidžianti atskirti įvairiais muzikos instrumentais išgaunamą tą patį toną. Antai smuikas ir trimitas gali skleisti tą patį toną, t. y. garsą, sudarytą iš to paties pagrindinio tono, bet iš skirtingų virštonių.
Muzikos instrumento garso tembrą lemia būtent virštonių stipris. Skleidžiamų garsų *atitinkamų* virštonių stipris gali būti skirtingas (→ 5).

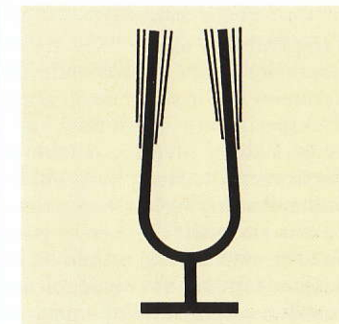
Garso bangos



1. Oro svyravimas sudavus į varpelį: su varpeliu susiliečiantis oro sluoksnis susispaudžia, šis sutankėjimas sklinda tolyn ir suspaudžia naują oro sluoksnį



2. Muzikos instrumentų ir žmogaus skleidžiamo garso dažnių intervalai (vargonai apima beveik visą žmogaus girdimo garso dažnių intervalą)



3. Kamertono skleidžiamas garsas turi tik pagrindinį toną

Santykinis garso stipris	Garsas
1	Girdos slenkstis
10^1	Normalus kvėpavimas
10^2	Lapų šlamesys dvelkiant vėjui
10^4	Bibliotekos fonas
10^5	Ramaus restorano fonas
10^6	Dviejų žmonių pokalbis
10^7	Intensyvaus transporto skleidžiamas garsas
10^9	Niagaros krioklių garsas
10^{10}	Metro traukinio bildesys
10^{12}	Kylančio lėktuvo propelerių triukšmas
10^{13}	Automato šūvių garsas
10^{14}	Kylančio nedidelio reaktyvinio lėktuvo ūžesys
10^{17}	Kylančios raketos keliamas triukšmas

4. Kai kurių garsų santykinio stiprio palyginimas su ribine garso stiprio verte 10^{-12} W/m^2 (silpnesnis už ribinį garsas negirdimas)



5. Trimitas ir gitara skleidžia to paties dažnio, bet skirtingo tembro, t. y. skirtingų virštonių, muzikinius garsus

Šiluminiai reiškiniai

Temperatūra ir šiluma

Palyginę pašildytą kūną ir ledo gabalėlį, sakome, kad pirmasis yra šiltesnis (artėdami prie jo, jaučiame šilumą), o antrasis — šaltesnis (artėdami prie jo, jaučiame šaltį). Fizikinis dydis, apibrėžiantis šiuos mūsų jausmus, vadinamas *temperatūra*.

Temperatūrą, kaip ir jėgą, įvertinant kiekybiškai, paprastai remiamasi fizikiniais efektais, kuriuos sukelia temperatūra. Tai galėtų būti, pavyzdžiui, šildomo kūno tūrio kitimas.

Temperatūros skalė

Gaminant temperatūros matavimo prietaisą (*termometrą*) ir sudarant jo skalę, remiamasi eksperimentų išvadomis, kad beveik visi kūnai šildomi plečiasi, o šaldomi traukiasi. Termometrą sudaro plonas stiklinis vamzdelis (kapiliaras), kurio vienas galas užlydytas, o kitame yra nedidelė skysčio (vandens, alkoholio ar gyvsidabrio) pripildyta kolbelė. Graduojant termometro skalę, pirmiausia reikia nustatyti atskaitos taškų temperatūrą (→ 1).

Termometro Celsijaus temperatūros skalė graduojama taip. Vienos atmosferos slėgio aplinkoje termometro kolbelė įdedama į indą su tirpstančiu ledu ir laikoma jame tol, kol susilygina ledo bei termometro temperatūra, be to, nusistovi tam tikras skysčio, pavyzdžiui, gyvsidabrio, stulpelio aukštis. Jis ir laikomas skalės nuliu. Po to, esant tam pačiam vienos atmosferos slėgiui, termometro kolbelė panardinama į indą su verdančiu vandeniu. Kai termometro bei vandens temperatūra susilygina ir gyvsidabrio stulpelis nustoja kilti, jo aukštis pažymimas 100 laipsnių.

Stiklinio vamzdelio dalis tarp šių dviejų taškų (0 ir 100) padalijama į 100 lygių dalių, kurių kiekviena vadinama *Celsijaus laipsniu*. Jei gyvsidabrio stulpelis pakyla viena dalimi, sakome, kad temperatūra padidėjo vienu Celsijaus laipsniu (1 °C). Paveiksluose pavaizduoti ir kitokie termometrai (→ 2, → 3, → 4).

Šiluma

Suglauskime du skirtingos temperatūros kūnus. Tas, kurio temperatūra aukštesnė, perduos antrajam tam tikrą kiekį energijos, vadinamos *šilumine energija*, arba paprasčiausiai *šiluma*.

Ilgą laiką buvo manoma, kad šiluma yra neapčiuopiamas skystis, esantis kūnuose ir tekantis iš karštesnio kūno į šaltesnį tol, kol abiejų kūnų temperatūra susilygina. B. Rumfordo (B. Rumford), H. Devio (H. Davy) ir Dž. P. Džaulio (J. P. Joule) eksperimentai šią hipotezę paneigė. Dž. P. Džaulis nustatė ryšį tarp šilumos vieneto (*kalorijos*) ir energijos vieneto (*džaulio*).

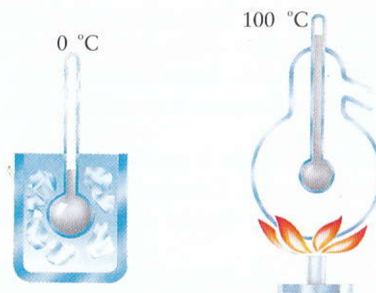
Taigi šiluma yra tam tikros rūšies energija, todėl ji, kaip ir bet kurios kitos rūšies energija, neišnykdama bei nesusikurdama gali nesunkiai virsti kitos rūšies energija (energijos tvermės ir virsmo dėsnis).

Šilumos perdavimą galima aiškinti kaip kinetinės energijos perdavimą susiduriant dalelėms, iš kurių sudaryti abu kūnai, arba kaip spinduliavimo energijos perdavimą iš vieno kūno į kitą. Čia kalbama ne apie „turimą šilumą", o tik apie *sugertą* arba *atiduotą* šilumą. Energija, kurią kūnas gauna arba kurios netenka šilumos perdavimo būdu, vadinama *šilumos kiekiu*.

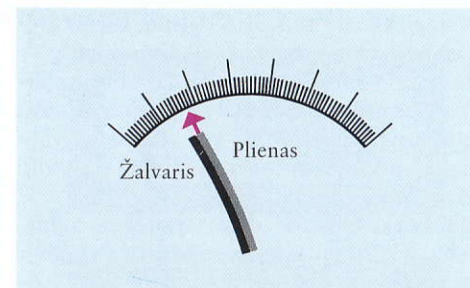
Anksčiau šilumos kiekis buvo matuojamas *kalorijomis* (cal). Kalorija — tai šilumos kiekis, kurio reikia 1 g vandens temperatūrai padidinti 1 °C. Dabar vartojamas šilumos kiekio SI vienetas — *džaulis* (J). Energija, atitinkanti vieną kaloriją, lygi 4,18 J. Ją galima apskaičiuoti naudojant įtaisą, panašų į Dž. P. Džaulio (→ 6).

Vienas per skridinį permesto siūlelio galas pririšamas prie masės *M* svarsčio, o kitas užvyniojamas ant ritės. Ši užmaunama ant ašies su mentelėmis galo ir mentelės įmerkiamos į vandenį. Sakykime, svarstis krinta iš aukščio *h*. Energijos kiekis ΔQ, kurį dėl mentelių trinties sugeria vanduo, lygus svarsčio gravitacijos jėgos atliktam darbui *Mgh minus* kinetinė energija, kurią svarstis perduoda žemei atsitrenkdamas į ją, ir *minus* mechaninei trinties jėgai įveikti reikalingas darbas. Išmatavus vandens temperatūros pokytį, apskaičiuojama energija, atitinkanti vieną kaloriją.

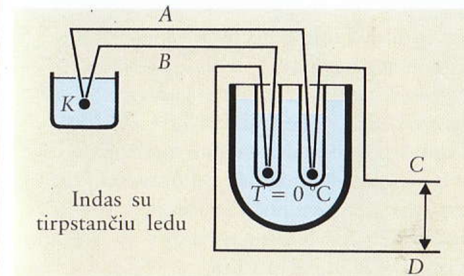
Temperatūra ir šiluma



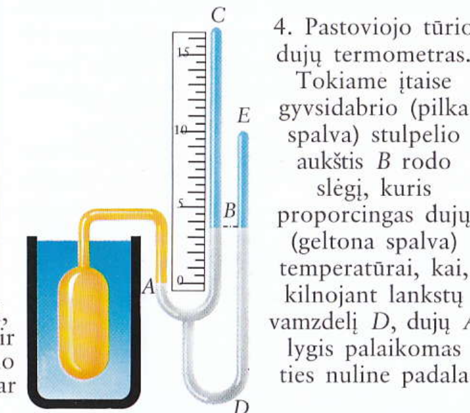
1. Celsijaus temperatūros skalės atskaitos taškai: kairėje — ledo tirpimo temperatūra (0 °C), dešinėje — vandens virimo temperatūra (100 °C)



2. Rodyklė nukrypsta dėl to, kad du metalai plečiasi nevienodai (skalė sugraduota temperatūros vienetais)



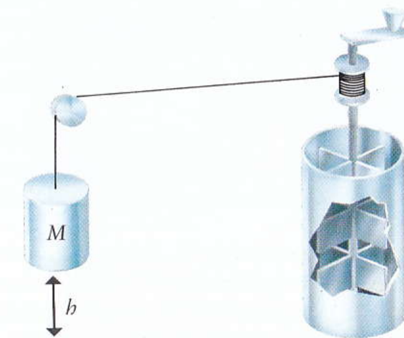
3. Termoelektrinis termometras. Į indą su skysčiu *K*, kurio temperatūrą reikia išmatuoti, įdedamas vienas suvirintų skirtingų metalų *A* ir *B* laidininkų (termoelemento) galas. Jei skysčio temperatūra nesutampa su inde, į kurį įdėti dar du termoelementai, palaikoma temperatūra (0 °C), tai laidininkų galuose *C* ir *D* atsiranda įtampa, proporcinga temperatūrų skirtumui



4. Pastoviojo tūrio dujų termometras. Tokiame įtaise gyvsidabrio (pilka spalva) stulpelio aukštis *B* rodo slėgį, kuris proporcingas dujų (geltona spalva) temperatūrai, kai, kilnojant lankstų vamzdelį *D*, dujų *A* lygis palaikomas ties nuline padala



5. 1 kg vandens temperatūrai pakelti 1 °C reikia 1000 cal (arba 4180 J)



6. Šilumos ir darbo lygiavertiškumui įrodyti Dž. P. Džaulis naudojo „malūnėlį", padarytą iš ašies su mentelėmis

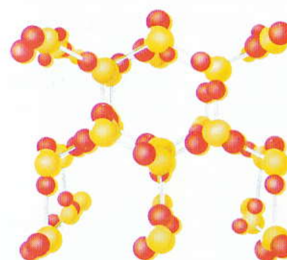
Lydymasis ir garavimas

Kietieji kūnai susideda iš dalelių, kurios erdvėje sudaro tvarkingą periodinę gardelę — kristalą (→ 1). Dalelės visada būna atskirtos viena nuo kitos, gali svyruoti apie savo pusiausvyros padėtį ir yra veikiamos vidinių traukos jėgų, todėl negali labai nutolti viena nuo kitos.
Kai kūnas šildomas, didėja jį sudarančių dalelių svyravimo kinetinė energija, drauge ir jų svyravimo amplitudė.
Kietasis kūnas gali virsti skystuoju, tik gavęs tokį šilumos kiekį, kurio pakanka dalelių išsidėstymo tvarkai suardyti. Kietosios medžiagos virsmas skystąja vadinamas *lydymusi*.
Kiekviena vienalytė medžiaga turi pastovią savo *lydymosi temperatūrą*. Jei lydomas kūnas šildomas, jo temperatūra išlieka pastovi. Ta šiluma suvartojama darbui, reikalingam dalelių traukos jėgoms įveikti.
Šilumos kiekis, reikalingas vienam kilogramui kietosios kristalinės medžiagos išlydyti, vadinamas *savitąja lydymosi šiluma*. Jos matavimo vienetas yra džaulis kilogramui (J/kg). Pavyzdžiui, ledo lydymosi temperatūra yra 0 °C. Laikomas 0 °C temperatūros terpėje ledas nesilydys, tuo tarpu šildomas jis pradės lydytis, bet jo temperatūra nepakis (bus lygi 0 °C), be to, vienam kilogramui ledo išlydyti prireiks $3{,}4 \cdot 10^5$ J. Taigi ledo savitoji lydymosi šiluma lygi $3{,}4 \cdot 10^5$ J/kg (→ 2). Ir atvirkščiai, jei vandenį imsime šaldyti, jo temperatūra nukris iki 0 °C, po to, kol susidarys ledas, temperatūra daugiau nesikeis.
Šilumos kiekis, kurį medžiaga išskiria kietėdama, lygus šilumos kiekiui, reikalingam tai pačiai kietajai medžiagai paversti skysčiu (→ 5).
Skysčiai sudaryti iš dalelių, kurios gali judėti įvairiomis kryptimis, nors yra veikiamos traukos jėgų. Pavyzdžiui, paviršinės dalelės gali net išlėkti iš skysčio. Jei tų dalelių kinetinė energija maža, traukos jėgos išlaiko ją skysčio viduje, bet jei dalelės kinetinė energija didelė, dalelė gali atsiskirti nuo skysčio tiek, kad jos daugiau nebeveiktų kitų dalelių trauka. Aišku, kad dalelių, kurių energijos pakanka joms atsiskirti nuo skysčio, bus tuo daugiau, kuo aukštesnė skysčio temperatūra.
Išlėkusios iš skysčio ir nutolusios nuo jo dalelės sudaro *garus*. *Garavimas* yra toks vyksmas, kurio metu skystoji medžiaga virsta dujomis.
Yra žinoma, kad, norint išgarinti vieną kilogramą tam tikro skysčio, reikia suteikti jam atitinkamą šilumos kiekį, būdingą tam skysčiui. Tas šilumos kiekis vadinamas *savitąja garavimo šiluma* (→ 3). Jos matavimo vienetas taip pat yra džaulis kilogramui (J/kg).
Virsdami skysčiu, t. y. *kondensuodamiesi*, garai atiduoda tokį pat šilumos kiekį, kokio reikėjo jiems susidaryti. Taigi savitoji kondensacijos šiluma lygi savitajai garavimo šilumai. Pavyzdžiui, vandens ji yra $2{,}3 \cdot 10^6$ J/kg.
Dėmesio vertas dar vienas medžiagos būsenos kitimas, vadinamas *sublimacija*. Tai tiesioginis garų virsmas kietuoju kūnu ir atvirkščiai. Jis būdingas jodui ir stebimas kambario temperatūroje.

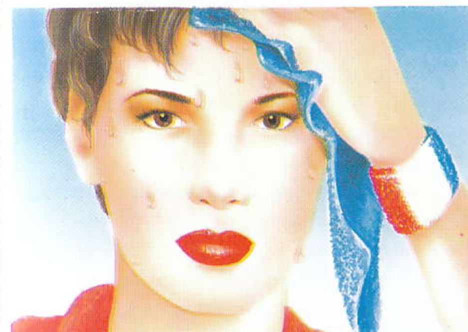
Slėgio įtaka

Medžiagos lydymosi ir kietėjimo temperatūra priklauso nuo terpės, kurioje yra ta medžiaga, slėgio, t. y. nuo jėgos, veikiančios kietojo kūno, skysčio ar dujų vienetinį paviršių. Pavyzdžiui, terpėje, kurios slėgis didesnis už atmosferos slėgį, ledas lydosi būdamas žemesnės negu 0 °C temperatūros (→ 4).
Slėgis daro didelę įtaką ir garavimui.
Į indą įpilto skysčio kai kurios dalelės išlekia iš skysčio ir laikosi laisvoje indo dalyje. Tos dalelės sudaro garus. Garų dalelės juda visomis kryptimis ir netgi gali grįžti į skystį. Taigi susidaro du jų srautai: išlekiančių iš skysčio dalelių ir grįžtančių.
Kai iš skysčio daugiau dalelių išlekia negu grįžta, skystis *garuoja* (p. 35 → 1a), o kai daugiau dalelių grįžta nei išlekia, garai *kondensuojasi* (p. 35 → 1b).

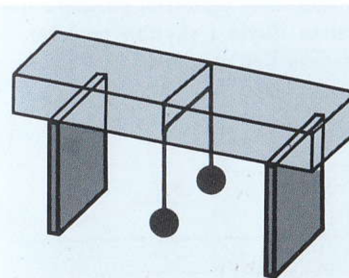
Būsenos kitimas



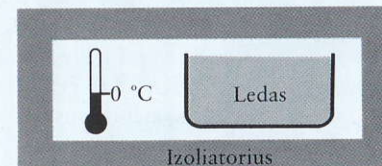
1. Kristalinė ledo sandara: kiekvienas deguonies atomas (geltonas rutuliukas) yra susijęs su keturiais vandenilio atomais (raudonais rutuliukais)

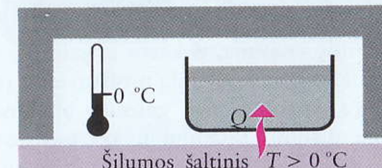


3. Garavimas yra toks vyksmas, kurio metu sugerianti šilumą skystoji medžiaga virsta dujomis (1 kg vandens išgarinti reikia $2{,}3 \cdot 10^6$ J). Prakaituojančio žmogaus kūno temperatūra mažėja

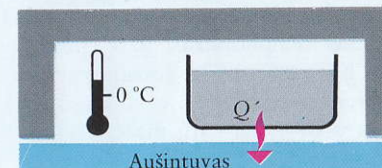


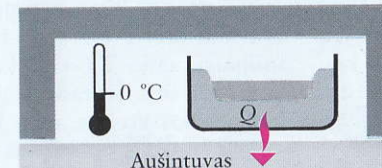
4. Įtempta virvė slegia ledo paviršių, todėl ledas tirpsta, virvė leidžiasi žemyn, o virš jos esantis skystis tuoj pat sušąla





2. Viršuje: kai terpės temperatūra lygi 0 °C, o slėgis lygus 1 atm, ledas nesilydo; apačioje: gaudamas šilumos kiekį, lygų $3{,}4 \cdot 10^5$ J/kg, ledas lydosi, bet jo temperatūra nekinta (0 °C)





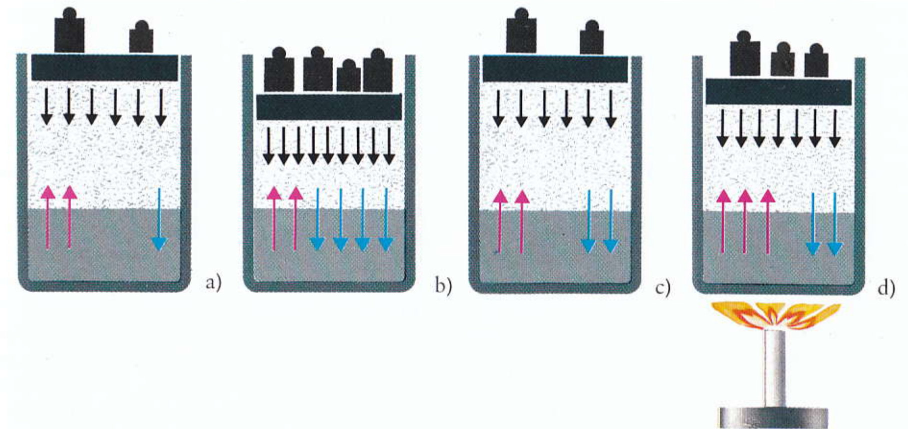
5. Viršuje: 0 °C temperatūros vanduo sušąla (slėgis lygus 1 atm); apačioje: kietėjančio vandens temperatūra nekinta

Garuojančio skysčio išorėje, vienetinio tūrio jos dalyje, atsiranda vis daugiau dalelių, todėl slėgis čia ima didėti, taigi *garų slėgis* didėja.
Laikui bėgant grįžtančių atgal į skystį dalelių skaičius pradeda didėti. Kai grįžtančių ir išlekiančių dalelių skaičius susilygina, tarp skysčio bei garų nusistovi pusiausvyra (→ 1c). Tokie garai vadinami *sočiaisiais*, o jų slėgis — *sočiųjų garų slėgiu*.
Kylant skysčio temperatūrai, didėja jo dalelių kinetinė energija, o kartu ir galinčių išlėkti dalelių skaičius. Tada nusistovėjusi pusiausvyra sutrinka, nes garuose atsiranda daugiau dalelių. Ilgainiui ji vėl nusistovi. Tačiau šią naują pusiausvyrą atitinka kitokia sočiųjų garų slėgio vertė (→ 1d). Sočiaisiais gali virsti netgi atmosferos vandens garai (→ 2a). Jiems kondensuojantis ant bet kokio terpės temperatūros paviršiaus, susidaro rasa (→ 2b).
Sočiųjų vandens garų slėgio priklausomybė nuo temperatūros (→ 3) rodo, kad atitinkamos pusiausvyros būsenos tarp skysčio ir garų temperatūros bei slėgio vertės sudaro kreivę, vadinamą *garavimo kreive*. Jei, esant tam tikrai temperatūrai, garų slėgis virš skysčio bus mažesnis už sočiųjų garų slėgį, tai skystis virs garais, o jei didesnis už sočiųjų garų slėgį, tai garų mažės, nes jų dalelės ilgainiui grįš į skystį.
Lydymosi kreive vadinama kreivė, kuri atspindi skystosios ir kietosios kūno būsenos pusiausvyrą. Garavimo kreivė (→ 3) ir lydymosi kreivė susijungia taške T (→ 4), kuris priklauso abiem kreivėms. Šis taškas taip pat priklauso sublimacijos kreivei, taigi jis yra visų trijų būsenų — skysčio, garų ir kietojo kūno — bendras taškas. Jis vadinamas *trigubuoju tašku*.

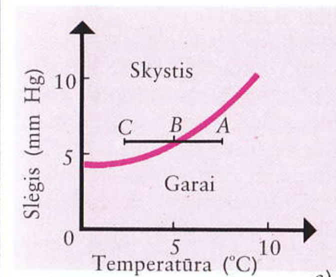
Virimas

Padidinus skysčio temperatūrą iki tam tikros vertės, skystyje stebimas naujas reiškinys — *virimas*. Tada visame skystyje susidaro garų burbuliukai, kurie kyla į paviršių ir išlekia iš skysčio.
Esant tam tikram pastoviam slėgiui, vienalyčio skysčio virimo temperatūra visada yra vienoda. Didėjant išorės slėgiui, ji didėja, ir atvirkščiai. Pavyzdžiui, kalnuose, kur atmosferos slėgis mažesnis negu jūros lygyje, vanduo užverda būdamas žemesnės negu 100 °C temperatūros. Tuo tarpu didelio slėgio sąlygomis (pavyzdžiui, greitpuodyje arba garvežio katile) vandens virimo temperatūra yra didesnė už 100 °C (→ 5).
Kad skystis užvirtų, jame turi būti ištirpusio oro ar kitų dujų.
Oro burbuliukai skystyje, pavyzdžiui, vandenyje, yra veikiami slėgio, didesnio negu atmosferos slėgis (taip esti tada, kai oro burbuliukai yra labai mažų matmenų ir paprastai plika akimi nematomi).
Temperatūrai kylant, didėja atskirų oro dalelių ir vandens garų, kurių taip pat yra tuose burbuliukuose, kinetinė energija, o drauge ir vidinis slėgis.
Toliau šildant skystį, oro burbuliukai ima didėti, tam tikrą akimirką pasidaro matomi ir pagaliau iškyla į skysčio paviršių. Juose esantis oras bei vandens garai išmetami iš vandens.

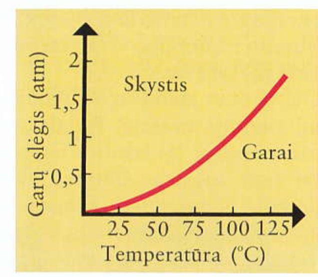
Būsenos kitimas



1. Slėgio ir šilumos įtaka garavimui. Iš kairės: a) skysčio garavimas; b) garų slėgio didėjimas ir garų kondensacija; c) tarp skysčio ir garų nusistovi pusiausvyra (kiek molekulių išlekia iš skysčio, tiek jų ir sugrįžta); d) temperatūros didėjimas (molekulės įgyja daugiau kinetinės energijos ir jų daugiau išlekia iš skysčio)

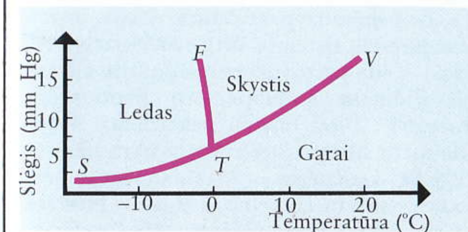




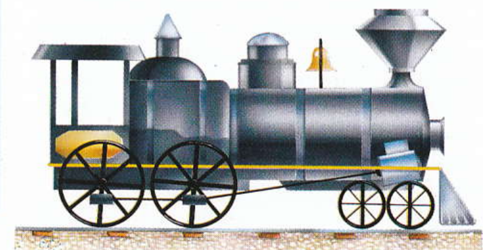


2. Vandens garų būsenos kitimo diagrama (a) ir garų kondensavimasis ant augalo naktį atvėsus orui (b)

3. Vandens garavimo kreivė



4. Vandens būsenos diagrama. S, F ir V yra atitinkamai sublimacijos, lydymosi ir garavimo kreivės. Taške T (vadinamajame trigubajame taške) egzistuoja visos trys būsenos



5. Kai slėgis lygus 17 atm, vanduo garvežio katile užverda sušilęs iki 205 °C

Termodinamika

Termodinamikos dėsniai

Jau žinome, kad šiluma yra viena iš energijos rūšių. Ji gali būti paversta darbu ir atvirkščiai. Fizikos mokslo dalis, tirianti šilumos ir darbo ryšius, vadinama *termodinamika*. Panagrinėkime pagrindinius termodinamikos dėsnius.

Pirmasis termodinamikos dėsnis — tai ne kas kita, kaip praplėstas energijos tvermės ir virsmo dėsnis, kuris teigia, kad *energija neišnyksta ir nesukuriama, tik vienos rūšies energija gali virsti kitos rūšies energija arba būti perduota iš vieno kūno kitam.* Jį galima formuluoti dar ir taip: *sistemos gautas šilumos kiekis padidina jos vidinę energiją ir yra eikvojamas darbui, kurį atlieka sistema, veikdama kitus kūnus.*

Kitaip tariant, vykstant bet kokiam virsmui, sistemos energijos pokytis lygus energijos kiekiui, kurį sistema gauna iš aplinkos. Tai paaiškina, kodėl, esant trinčiai, mechaninė energija neišsaugoma — juk dalis jos virsta šilumine energija. Tuo tarpu visa sistemos energija yra tvari.

Dėl trinties stabdomo riedančio rato kinetinė energija mažėja. Pagal kinetinės energijos teoremą, jei trinties jėgos atlieka darbą, tai rato sugertas šilumos kiekis lygus tam darbui. *Neįmanoma sukurti periodinio veikimo šiluminės mašinos, kuri atliktų darbą, nesugerdama atitinkamo šilumos kiekio.*

Kaip pavyzdį išnagrinėkime paprasto benzininio variklio ciklą (→ 1). Sakykime, variklio cilindre esančių dujų pradinis slėgis yra p_1, o tūris V_1 (*1*-oji būsena). Pirmiausia dujos suslegiamos adiabatiškai, t. y. jos negauna šilumos iš aplinkos ir jai neatiduoda šilumos. Dėl to dujų slėgis padidėja iki p_2, o tūris sumažėja iki V_2 (*2*-oji būsena). Toliau slėgis didinamas nekeičiant dujų tūrio V_2 (*3*-ioji būsena). Vykstant šiam procesui, dujos gauna šilumos kiekį Q_g. Pagaliau dujų slėgis adiabatiškai mažinamas tol, kol dujų tūris padidėja iki V_1 (*4*-oji būsena), taigi vėl grįžtama į pradinę būseną, atiduodant šilumos kiekį Q_a. Šių veiksmų rezultatas yra šiluminės mašinos darbas, atliktas dujoms sugeriant tam tikrą šilumos kiekį $Q_g - Q_a > 0$.

Pirmasis termodinamikos dėsnis konstatuoja bet kokios rūšies energijos tvermę, tačiau neprieštarauja tam, kad dalis šiluminės energijos būtų panaudota darbui atlikti. Remiantis šiuo dėsniu, teoriškai turėtų būti įmanoma sukti dviračio ratą jį šaldant, bet toks energijos virsmas akivaizdžiai neįmanomas.

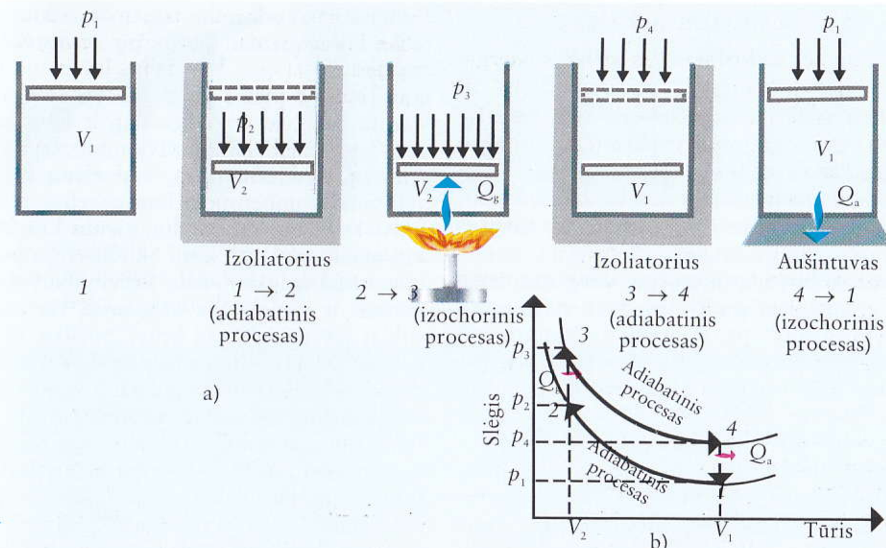
Tuo tarpu antrasis termodinamikos dėsnis leidžia nustatyti galimus energijos virsmus. Jis apibrėžiamas taip: *neįmanoma sukurti periodinio veikimo šiluminės mašinos, kuri atliktų darbą, sugerdama šilumą tik iš vieno šaltinio.* Jei šis dėsnis negaliotų, būtų įmanoma sukurti laivą, kuris variklio darbui naudotų tik iš jūros gaunamą energiją. Šį dėsnį galima nusakyti ir kitaip: *šiluma savaime visada sklinda iš šiltesnio kūno į šaltesnį.*

Antra vertus, tai nereiškia, kad šiluma negali pereiti iš šaltesnio kūno į šiltesnį (kaip tai atsitinka, pavyzdžiui, šaldytuvuose), tačiau tam reikia atlikti darbą.

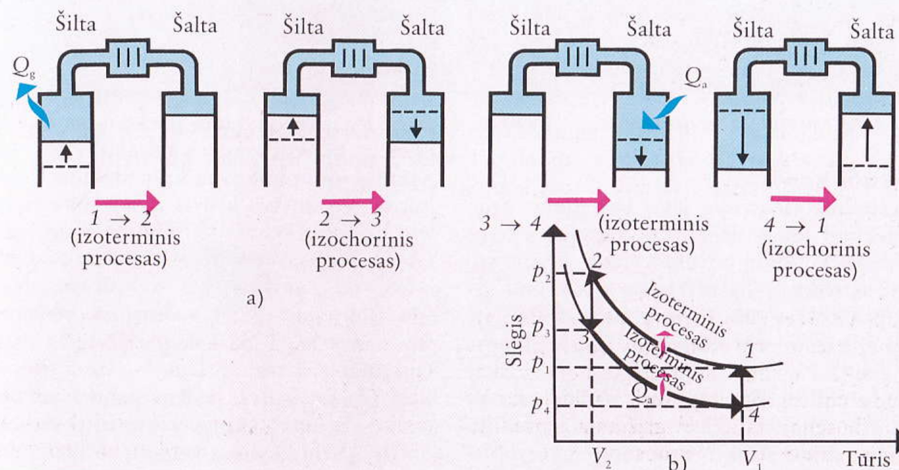
Sakykime, norime priversti suktis stabdomą ratą jį šaldydami. Situaciją galime suvokti taip: šaldomas kūnas netenka šilumos, kurią būtų galima panaudoti darbui atlikti, t. y. stabdžių sukeltai jėgai įveikti. Taigi, priešingai negu reikalauja antrasis termodinamikos dėsnis, reikėtų perduoti šilumą iš vis šaltesnio rato vis karštesniems stabdžiams.

Paveiksle (→ 2) pavaizduotas idealusis Stirlingo šaldymo ciklas. Iš pradžių sistema yra pirmosios būsenos (*1*). Po to, nekintant temperatūrai, ji suslegiama (vyksta izoterminis procesas). Pereidama į *2*-ąją būseną, sistema netenka tam tikro šilumos kiekio Q_g. *2*-oji būsena pakeičiama *3*-iąja, palaikant pastovų sistemos tūrį (izochorinis procesas). Tada pastovios temperatūros sąlygomis didinant sistemos tūrį (izoterminis procesas), *3*-ioji būsena pakeičiama *4*-ąja. Tuo metu sistema sugeria tam tikrą šilumos kiekį Q_a. Galiausiai įvyksta dar vienas procesas — sistema pereina iš *4*-osios būsenos į *1*-ąją, išlaikydama pastovų tūrį (izochorinis procesas), taigi ji grįžta į pradinę (*1*) būseną. Per visą ciklą sistema atlieka darbą, kuriam reikėjo šilumos kiekio $Q_g - Q_a < 0$.

Cikliniai procesai



1. Paprasto benzininio variklio veikimo schema ir jo ciklo diagrama. Šis ciklas sudarytas iš dviejų adiabatinių procesų (*1 → 2* ir *3 → 4*), kurių metu sistema negauna šilumos iš aplinkos ir neatiduoda jai šilumos, bei dviejų izochorinių procesų (*2 → 3* ir *4 → 1*), kuriems vykstant nekinta sistemos tūris



2. Šaldytuvo veikimo schema ir jo ciklo (Stirlingo ciklo) diagrama. Šis ciklas sudarytas iš dviejų izoterminių procesų (*1 → 2* ir *3 → 4*), kurių metu yra pastovi sistemos temperatūra, ir dviejų izochorinių procesų (*2 → 3* ir *4 → 1*), kuriems vykstant nekinta sistemos tūris

Elektra

Elektros krūvis ir elektrinis laukas

Maždaug 500-aisiais metais pr. Kr. Talis Miletietis (Thalēs) pastebėjo, kad skudurėliu patrintas gintaro gabalėlis traukia mažus kūnus. Šio reiškinio negalima priskirti prie gravitacinio (vartojant šiuolaikinę terminologiją), nes nepatrintas gintaras tos savybės neturi.
Gamtoje buvo aptikta jėgų, daug stipresnių už gravitacijos jėgas. Jos buvo pavadintos „elektrinėmis" pagal graikišką gintaro pavadinimą (*ēlektron*). Panašūs reiškiniai pastebėti net trinant stiklą, smalką, ebonitą ir pan. (→ 1).
Sistema, sudaryta iš šeivamedžio rutulėlio, šilkiniu siūlu prikabinto prie stovo, vadinama „elektrine svyruokle". Tarkime, turime dvi tokias svyruokles, išdėstytas vieną greta kitos (→ 2a). Paliesti skudurėliu patrintomis stiklinėmis lazdelėmis, abu rutulėliai atsistumia vienas nuo kito tam tikra jėga (→ 2b). Jei viena lazdelė būtų iš smalkos, o kita — iš stiklo, rutulėliai trauktų vienas kitą (→ 2c).
Prie vienos iš šių svyruoklių glauskime įvairias medžiagas. Matysime, kad vienos jų elgiasi kaip stiklas, kitos — kaip smalka. Tai rodo, kad gamtoje egzistuoja dviejų rūšių elektros krūviai. Stiklo elektros krūvis yra teigiamas, smalkos — neigiamas. Taigi galime sakyti: *vienarūšiai elektros krūviai vienas kitą stumia, o įvairiarūšiai — traukia.*

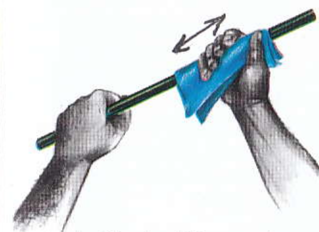
Elektros krūvis

Pagrindinė elektrinių jėgų atsiradimo priežastis yra kūnų gebėjimas kaupti elektros krūvius. Tų kūnų poveikis vienas kitam gali būti skirtingas. Jis priklauso nuo kūnų sukaupto krūvio rūšies. Apie tokius kūnus sakoma, kad jie yra įelektrinti teigiamai arba neigiamai.
Skudurėliu patrinta stiklinė lazdelė, artinama prie teigiamai įelektrinto svyruoklės rutulėlio, jį ima stumti. Prie rutulėlio artindami skudurėlį, kuriuo buvo trinta lazdelė, pastebėsime, kad jis rutulėlį traukia. Remdamiesi šiuo bandymu, galime padaryti išvadą, kad skudurėliu trinamas stiklas įsielektrina teigiamai, tuo tarpu skudurėlis — neigiamai.
Taigi turime pirmą bandymą, patvirtinantį, kad medžiagoje yra teigiamąjį ir neigiamąjį krūvį turinčių dalelių (krūvininkų), be to, jos čia pasiskirsčiusios taip, kad vienų sukelti reiškiniai kompensuoja kitų sukeltus reiškinius. Trindami skudurėliu, vienus krūvininkus atskiriame nuo kitų. Skudurėlis atplėšia nuo stiklo neigiamuosius krūvininkus (elektronus) ir įsielektrina neigiamai, tuo tarpu stiklas įgyja teigiamąjį krūvį. Smalka, užuot netekusi elektronų, gauna juos iš skudurėlio, dėl to šis įsielektrina teigiamai ir stumia stiklo įelektrintą svyruoklės rutulėlį (→ 3).
Įelektrinta svyruoklė naudojama elektros krūviui matuoti (→ 4). Jeigu ji veikia elektrinę svyruoklę *B* tokia pačia jėga, kaip ir svyruoklę *C*, tai svyruoklės *C* krūvis yra toks pat, kaip svyruoklės *B*. Jeigu jėga, kuria įelektrinta svyruoklė veikia svyruoklę *D*, lygi pusei jėgos, veikiančios svyruoklę *B*, sakoma, kad *B* krūvis yra dvigubai didesnis negu *D*. Taip pat galima teigti: jei jėga, kuria bandomąją svyruoklę veikia svyruoklė *A*, yra *n* kartų didesnė už jėgą, kuria tą svyruoklę veikia svyruoklė *B*, tai *A* krūvis yra *n* kartų didesnis už *B* krūvį.

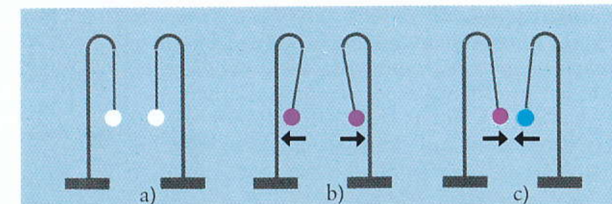
Elektrinis laukas

Erdvėje elektros krūvį *Q* turinti dalelė tam tikra jėga veikia kitas įelektrintas daleles, esančias bet kuriame jos aplinkos taške. Viename iš jos aplinkos taškų padėkime dalelę, kurios teigiamasis krūvis *q* yra toks mažas, kad nekeičia krūvio *Q* sukurto jėgos lauko (→ 5). Jėgos, veikiančios krūvininką, bei to krūvio *q* santykis yra vektorinis dydis, žymimas raide $\vec{E}$ ir vadinamas *elektrinio lauko stipriu*. Tada krūvį *q* turinčią dalelę veikianti jėga lygi $\vec{F} = q\vec{E}$.
Kiekvienam erdvės taškui galima priskirti elektrinio lauko stiprio vektorių ir nubrėžti linijas, kurių liestinės sutaptų su lauko stiprio vektoriumi kiekviename erdvės taške. Tos linijos vadinamos elektrinio lauko *jėgų linijomis* (→ 6).

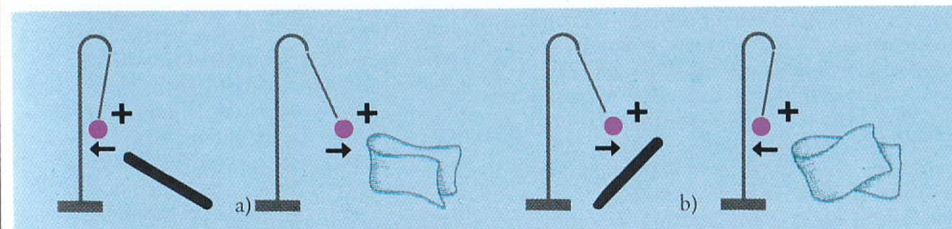
Elektros krūvis ir elektrinis laukas



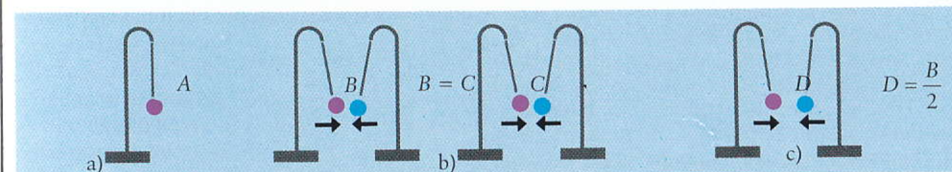
1. Skudurėliu patrinta stiklinė lazdelė traukia popieriaus skiauteles



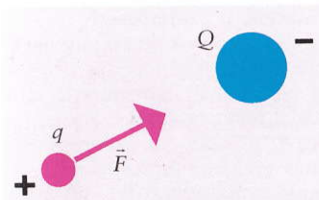
2. Iš kairės į dešinę: a) du neįelektrinti rutulėliai netraukia ir nestumia vienas kito; b) du vienarūšiais krūviais įelektrinti rutulėliai stumia vienas kitą; c) du įvairiarūšiais krūviais įelektrinti rutulėliai traukia vienas kitą



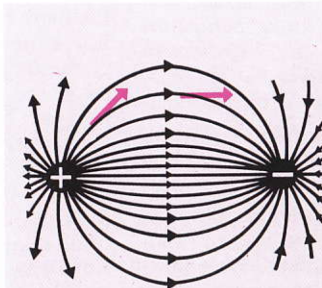
3. Elektros krūvių sąveika: a) skudurėliu patrinta stiklinė lazdelė įgyja teigiamąjį krūvį ir stumia teigiamai įelektrintą rutulėlį (tuo tarpu skudurėlis įgyja neigiamąjį krūvį ir traukia rutulėlį); b) skudurėliu patrinta smalkos lazdelė elgiasi priešingai



4. Elektros krūvio matavimas. Dviejų skirtingų įelektrintų svyruoklių krūvis yra tokio pat didumo, jeigu bandomoji svyruoklė (*A*) veikia jas (*B* ir *C*) vienoda jėga



5. Elektros krūvis *q* erdvėje sukuria elektrinį lauką, kurio stipris yra vektorius $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$



6. Teigiamojo ir neigiamojo krūvio sukurto elektrinio lauko jėgų linijos. Jų liestinė (raudona rodyklė) bet kuriame taške sutampa su lauko stiprio vektoriumi tame taške. Susitarta laikyti, kad elektrinio lauko stiprio vektorius nukreiptas iš teigiamojo krūvio į neigiamąjį

Elektrinis potencialas

Kulono dėsnis

Pagal veiksmo ir atoveikio dėsnį, du taškiniai krūvininkai veikia vienas kitą tokio pat didumo, bet priešingų krypčių jėgomis. Prancūzų fizikas Š. O. Kulonas (Ch. A. Coulomb) bandymais nustatė, kad *jėga, kuria du taškiniai krūvininkai traukia arba stumia vienas kitą, yra tiesiog proporcinga jų krūviams ir atvirkščiai proporcinga atstumo tarp krūvininkų kvadratui* (→ 1). Šį dėsnį, vadinamą *Kulono dėsniu*, galima užrašyti tokia formule:

$$F = \frac{k}{\varepsilon} \frac{qq'}{d^2};$$

čia q ir q' — krūvių modulis, d — atstumas tarp krūvininkų, F — krūvininkų sąveikos jėga, k — proporcingumo koeficientas, ε — koeficientas, priklausantis nuo terpės, kurioje yra krūvininkai, savybių (jis vadinamas terpės *dielektrine skvarba*).

Krūvio matavimo vienetas SI sistemoje vadinamas *kulonu* ir žymimas raide C.

Potencialų skirtumas (įtampa)

Elektrinės jėgos turi labai svarbią savybę — jos yra *konservatyvios*. Judantį krūvininką kiekviename elektrinio lauko taške veikia elektrinė jėga. Norint tą krūvininką perkelti iš vienos vietos į kitą, reikia atlikti darbą įveikiant elektrinio lauko jėgas. Jeigu, judėdamas uždara trajektorija, krūvininkas sugrįžta į pradinį tašką, tai atliktas darbas lygus nuliui. Darbas, kuris atliekamas prieš lauko jėgas perkeliant krūvininką iš vieno taško į kitą, lygus darbui, atliekamam grąžinant tą krūvininką į pradinį tašką, tačiau šių darbų ženklai yra priešingi (→ 2). Vienu atveju laukas priešinasi krūvininko judėjimui, kitu — jam padeda. Pirmuoju atveju darbas yra teigiamas, antruoju — neigiamas. *Darbas, kurį reikia atlikti elektriniame lauke perkeliant krūvininką iš vieno taško į kitą, nepriklauso nuo to krūvininko nueito kelio* (→ 3). Jėga, veikianti krūvininką, priklauso tik nuo krūvio q didumo: $\vec{F} = q\vec{E}$, o darbas — tik nuo pradinės ir galinės krūvininko padėties. Jei krūvis vienetinis, tai darbas, kurį reikia atlikti prieš lauko jėgas pernešant krūvininką iš taško A į tašką B, priklauso tik nuo tų taškų padėties. Toks darbas apibūdina lauko parametrą, vadinamą *taškų A ir B potencialų skirtumu* $\varphi_A - \varphi_B$, arba *įtampa* U_{AB} (→ 4).

SI sistemoje potencialų skirtumo, arba įtampos, matavimo vienetas yra *voltas* (V). Tai dviejų elektrinio lauko taškų potencialų skirtumas, lygus 1 J darbui, kuris atliekamas perkeliant 1 C krūvį turinčią dalelę iš vieno taško į kitą. Jei, perkeliant 1 C krūvininką iš taško A į tašką B, reikia atlikti darbą, lygų potencialų skirtumui $\varphi_A - \varphi_B$, tai q kartų didesnį krūvį turinčią dalelę pavyks perkelti tik atliekant q kartų didesnį darbą:

$$W_{AB} = q(\varphi_A - \varphi_B);$$

čia W_{AB} — darbas, kurį reikia atlikti. Paveiksle (→ 5) pavaizduoti dviejų vienodų teigiamųjų krūvininkų ekvipotencialiniai (vienodo potencialo) paviršiai. Toliau nuo krūvininkų esančio paviršiaus taškų potencialas yra mažesnis negu esančio arčiau krūvininkų.

Tarkime, turime elektrinį lauką, kurio kiekviename taške vektoriaus $\vec{E}$ kryptis ir modulis yra vienodi. Toks laukas, vadinamas *vienalyčiu*, susidaro, pavyzdžiui, tarp dviejų lygiagrečių plokštelių, kurių potencialų skirtumas U (→ 6). Norint perkelti vienetinį krūvininką iš vienos plokštelės į kitą, reikia atlikti darbą, lygų U. Tą krūvininką veikia jėga, kurios modulis lygus E. Laikydami, kad vienetinis krūvininkas juda jėgų linijos kryptimi, galėsime teigti, jog atliktas darbas $U = Ed$; čia d — atstumas tarp plokštelių. Taigi vienalyčio elektrinio lauko stipris $E = \frac{U}{d}$. Iš čia matyti, kad elektrinio lauko stiprio matavimo vienetas yra voltas metrui (V/m).

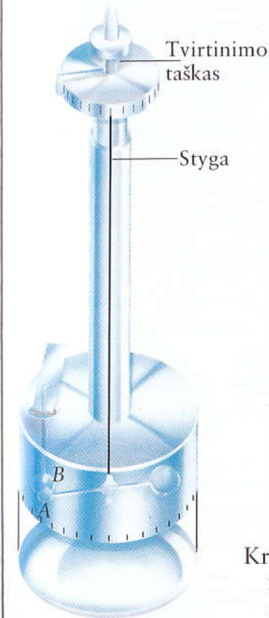
Krūvininkas q, esantis taške, kurio potencialas φ, turi potencinės energijos $q\varphi$ ir siekia jos įgyti mažiausiai. Teigiamasis krūvininkas stengiasi užimti padėtį, kurioje potencialas mažesnis, neigiamasis — atvirkščiai.

Elektros laidininkai ir izoliatoriai

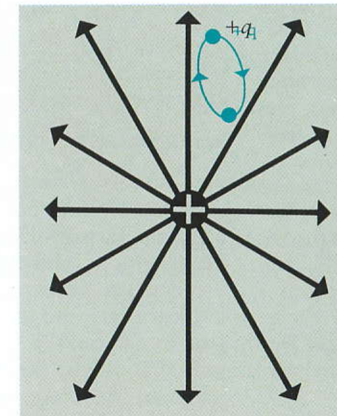
Kai kūne esančių elektros krūvininkų teigiamasis krūvis lygus neigiamajam krūviui, tai kūnas yra elektriškai neutralus ir jame nevyksta joks elektrinis reiškinys. Kūnai, turintys laisvųjų, t. y. galinčių judėti, krūvininkų, vadinami *elektros laidininkais*.

Kai netvarkingai judantys (dėl šiluminių reiškinių) krūvininkai ima judėti viena kryptimi, sakoma, kad atsirado elektros srovė. Kūnai, neturintys judrių elektros krūvininkų ir dėl to nelaidūs srovei, vadinami *elektros izoliatoriais*.

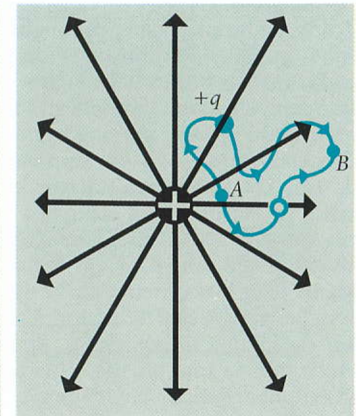
Elektrinis potencialas



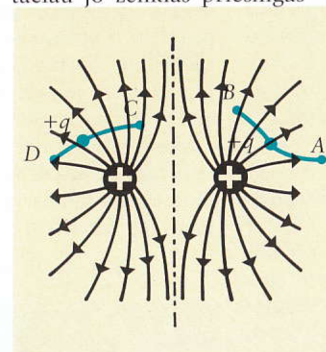
1. Kairėje: sukamosios svarstyklės įelektrintų kūnų sąveikos jėgai matuoti. Pagal stygos susisukimą išmatuojama jėga, kuria kūnas B veikia kūną A



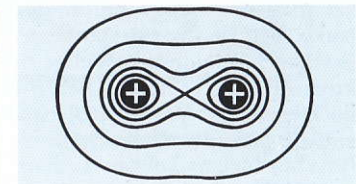
Krūvininko perkėlimas priešingomis kryptimis. Abiem atvejais darbas yra vienodo didumo, tačiau jo ženklas priešingas



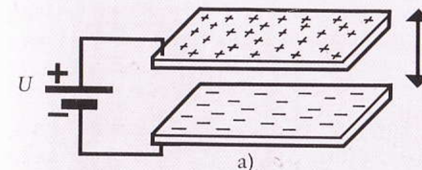
3. Darbas, atliekamas perkeliant krūvininką q iš taško A į tašką B, nepriklauso nuo trajektorijos

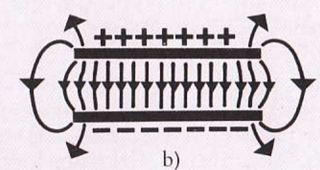


4. Teigiamasis krūvininkas savaime juda iš didesnio potencialo taško į mažesnio potencialo tašką, t. y. iš C į D (lauko jėgų darbas yra teigiamas). Kitu atveju (judant iš A į B) darbas neigiamas



5. Dviejų vienodų krūvininkų sukurto lauko ekvipotencialiniai paviršiai; visi jie statmeni lauko jėgų linijoms (→ 4)





6. Dvi lygiagrečios plokštelės, kurių potencialų skirtumas lygus U. Visuose erdvės tarp plokštelių taškuose elektrinio lauko kryptis ir modulis yra vienodi. Lauko jėgų linijos tarpusavyje yra lygiagrečios, o abiem plokštelėms — statmenos (jei nekreiptume dėmesio į reiškinius, vykstančius prie plokštelių kraštų)

Elektrostatinė indukcija

Laidininkuose tam tikra dalis elektronų gali laisvai judėti (*laidumo elektronai*). Kai nėra elektrinio lauko, jie juda netvarkingai, kartais susidurdami su atomais ir keisdami savo judėjimo kryptį (→ 1).

Tokio laidininko galus prijungus prie baterijos gnybtų, laidininko viduje susidaro elektrinis laukas ir dėl to pro plokštumą, statmeną elektrinio lauko jėgų linijoms, viena ir kita kryptimi pereina nevienodas skaičius elektronų (→ 2, 4). Taip elektronai juda tol, kol krūvis pasiskirsto: kiekviename taške susidaro vidinis elektrinis laukas, kurio stipris yra toks pat, kaip išorinio lauko, o kryptis priešinga. Taigi krūvininką veikianti jėga kiekviename taške lygi nuliui.

Negalėdami išlėkti iš laidininko, krūvininkai susikaupia jo paviršiuje. Atsiradusi jėga yra statmena tam paviršiui (jei taip nebūtų, krūvininkai judėtų paviršiumi).

Aprašytas reiškinys vadinamas *indukcija*, tiksliau — *elektrostatinė indukcija* (→ 3).

Yra įrodyta, kad: 1) nusistovėjus krūvio pusiausvyrai, laidininko vidinis elektrinis laukas pasidaro lygus nuliui; 2) elektrinio lauko jėgų linijos yra statmenos laidininko paviršiui; 3) laidininko viduje nėra elektros krūvio (→ 5), vadinasi, įelektrinto laidininko visas krūvis yra tolygiai pasiskirstęs paviršiuje (esant pusiausvyrai).

Kondensatoriai. Elektrinio lauko energija

Du laidininkai, esantys arti vienas kito ir įelektrinti vienodo didumo įvairiarūšiais krūviais taip, kad kiekviena jėgų linija eina iš teigiamai įelektrinto laidininko į neigiamai įelektrintą laidininką, sudaro sistemą, vadinamą *kondensatoriumi* (→ 5). Laidininkai, kuriuose indukuojamas visas krūvis, vadinami *kondensatoriaus plokštėmis*, arba *elektrodais*.

Norint perkelti teigiamąjį krūvį iš neigiamai įelektrintos plokštės į teigiamai įelektrintą plokštę, reikia, kaip žinoma, atlikti darbą, t. y. įveikti elektrinio lauko jėgas. Vadinasi, tarp vienos ir kitos plokštės egzistuoja potencialų skirtumas. Plokštėms suteikus dvigubai didesnį krūvį, darbas padvigubėja, suteikus tris kartus didesnį krūvį, patrigubėja ir taip toliau. Tačiau plokščių krūvio ir potencialų skirtumo santykis išlieka pastovus. Šiuo pastoviu santykiu nusakomas dydis, kuris vadinamas kondensatoriaus *elektrine talpa* ir išreiškiamas formule $C = \frac{Q}{U}$; čia C — elektrinė talpa, Q — elektros krūvis, U — kondensatoriaus plokščių potencialų skirtumas. Kai plokštės lygiagrečios, o atstumas tarp jų nedidelis, elektrinė kondensatoriaus talpa $C = \frac{\varepsilon S}{d}$; čia ε — terpės, esančios tarp plokščių, dielektrinė skvarba, S — vienos plokštės plotas, d — atstumas tarp plokščių.

SI sistemoje elektrinės talpos matavimo vienetas yra *faradas* (F). Tai talpa laidininko, kurio galuose atsiranda 1 V įtampa, kai jam suteikiamas 1 C krūvis. Toks vienetas yra labai didelis, todėl praktikoje vartojami mažesni, daliniai, vienetai: *mikrofaradas* (1 μF = 10^{-6} F), *pikofaradas* (1 pF = 10^{-12} F) ir kt.

Įelektrinant kondensatorių, elektronai perkeliami iš vienos plokštės į kitą išoriniu laidininku, prijungtu prie to kondensatoriaus plokščių. Laidininke turi būti priemonė, galinti atlikti darbą, t. y. perkelianti elektronus į neigiamai įelektrintą plokštę ir nugalinti elektronų patiriamą pasipriešinimo jėgą.

Perkelti elektronai sukaupia energiją. Erdvėje tarp plokščių susidaro elektrinis laukas. Išsielektrindamas kondensatorius išskiria energiją, kuri lygi

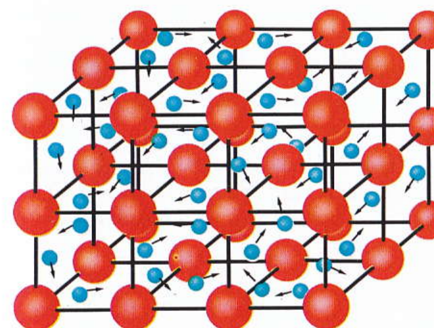
$$W = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C};$$

čia Q — kondensatoriaus krūvis, U — plokščių potencialų skirtumas, C — kondensatoriaus elektrinė talpa. Plokščiojo kondensatoriaus tūris tarp plokščių lygus Sd, potencialų skirtumas $U = Ed$. Todėl

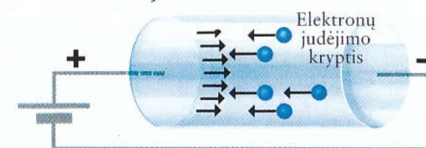
$$W = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon S}{d}(Ed)^2 = \frac{\varepsilon E^2 Sd}{2}.$$

Šią energiją padaliję iš elektrinio lauko užimamo tūrio Sd, gauname vienetinio tūrio energiją: $\frac{\varepsilon E^2}{2}$. Taigi apibendrindami galime teigti, kad elektrinio lauko energija pasiskirsto taip, kad jos tankis lygus $\frac{\varepsilon E^2}{2}$.

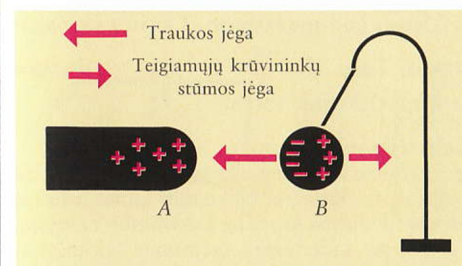
Elektrostatinė indukcija



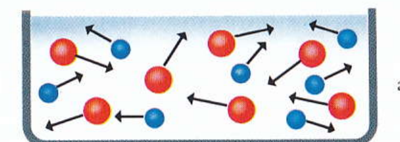
1. Metalo sandara. Nejudrūs jonai pavaizduoti raudona spalva, laisvieji elektronai — mėlyna spalva

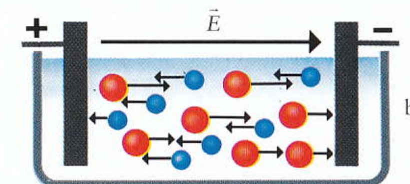


2. Prijungus prie laidininko galų įtampą, laisvieji elektronai juda didesnio potencialo taško link

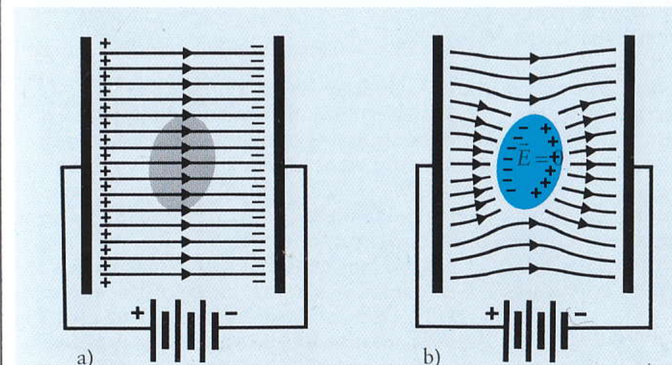


3. Elektrostatinė indukcija: prie įelektrinto kūno *A* priartinus neutralų laidininką *B*, jame krūvis persiskirsto





4. Elektrolito tirpale jonai juda netvarkingai (a). Veikiami elektrinio lauko (b), teigiamieji jonai (raudona spalva) juda prie elektrodo, kurio potencialas mažesnis, tuo tarpu neigiamieji jonai (mėlyna spalva) — prie elektrodo, turinčio didesnį potencialą



5. Tarp kondensatoriaus plokščių įdėjus izoliatorių (a), kurio krūvininkai nejudrūs, izoliatoriaus viduje atsiras elektrinis laukas, tuo tarpu įdėjus laidininką (b), judrieji jo krūvininkai susirinks laidininko paviršiuje, o elektrinis laukas laidininko viduje bus lygus nuliui

Elektros srovė ir galia

Sužinojome, kad *elektros srovė* atsiranda tada, kai laidininko judriosios elektringosios dalelės (teigiamieji ar neigiamieji krūvininkai) ima judėti kryptingai.

Elektros srovė apibūdinama fizikiniu dydžiu, kuris vadinamas *srovės stipriu*. Srovės stipris nusakomas elektros krūviu, perkeltu laidininko skerspjūviu tam tikra kryptimi per vienetinį laiką, ir žymimas raide I (→ 1).

Sakykime, per laiką t laidininko skerspjūviu prateka elektros krūvis q. Padalinę jį iš laiko t, rasime srovės stiprį I: $I = \frac{q}{t}$. Įvairiarūšės elektringosios dalelės juda skirtingomis kryptimis: teigiamosios — viena kryptimi, neigiamosios — priešinga kryptimi.

SI sistemoje srovės stiprio matavimo vienetas yra *ampėras* (A). Tai tokio stiprio srovė, kurią sukelia 1 C krūvis, pratekėdamas laidininko skerspjūviu per 1 s. Mums įprastais elektros įtaisais gali tekėti iki 20 A stiprio srovė.

Jei laidininku sujungiami du vienas nuo kito atskirti laidūs kūnai A ir B, be to, kūno B potencialas yra žemesnis (mažesnis) negu kūno A, tai iš A į B elektros srovė teka tol, kol abiejų kūnų potencialai susilygina. Kūno A krūvis sumažėja, o kūno B — padidėja (→ 2). Srovei tarp A ir B tekėti ilgesnį laiką reikia specialaus įtaiso — *generatoriaus*, tiekiančio krūvininkus kūnui A po to, kai jie perėjo iš A į B. Dėl generatoriaus veikimo kūnų A ir B potencialų skirtumas visada bus pastovus (→ 3). Tai reiškia, kad krūvininkas q, kurio potencinė energija $q\varphi_B$, bus perkeltas į kūną A, kur jo potencinė energija $q\varphi_A$ didesnė. Tokiu būdu generatorius tiekia energiją nagrinėjamos sistemos krūvininkams. Pasiekęs kūną A, krūvininkas q savaime pereina į B, nes B potencialas mažesnis už A, po to generatorius jį vėl grąžina į A. Kad grandine tekėtų pastovi srovė, grandinė turi būti uždara.

Omo dėsnis

Jei tarp A ir B palaikomas potencialų skirtumas U, juos jungiančiu laidininku teka srovė, kurios stipris lygus I. Potencialų skirtumą padidinus du kartus, srovės stipris padvigubėja. Taigi santykis $\frac{U}{I}$ lieka pastovus. Jis atspindi kiekybinę laidininko charakteristiką. Kūnus A ir B jungiantį laidininką pakeitę kitu ir pakartoję bandymą, gautume kitokį pastovų santykį, apibūdinantį laidininko *elektrinę varžą* (žymimą raide R): $R = \frac{U}{I}$. Gauta formule išreiškiamas vadinamasis Omo dėsnis: *laidininku tekančios srovės stipris I yra tiesiog proporcingas laidininko galų potencialų skirtumui (įtampai) U ir atvirkščiai proporcingas laidininko elektrinei varžai R* ($I = \frac{U}{R}$; → 4, 5).

SI sistemoje elektrinės varžos matavimo vienetas yra *omas* (žymimas graikiška raide Ω). 1 Ω lygus varžai tokio laidininko, kuriuo teka 1 A stiprio srovė, kai jo galų potencialų skirtumas lygus 1 V. Laidininko varža R yra tiesiog proporcinga jo ilgiui l ir atvirkščiai proporcinga skerspjūvio plotui S, be to, priklauso nuo medžiagos, iš kurios jis pagamintas. Taigi $R = \frac{\rho l}{S}$; čia ρ — medžiagos savitoji elektrinė varža.

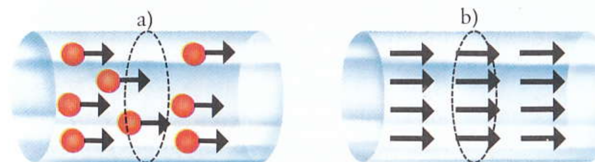
Galia (Džaulio dėsnis)

Jei vakuume krūvininkas laisvai juda nuo vieno gnybto prie kito, tai elektrinio lauko atliktas darbas tik didina kinetinę krūvininko energiją. Tuo tarpu judėdamas metaliniu laidininku, krūvininkas susiduria su metalo atomais ir dėl to perduoda dalį savo energijos metalui, taigi tam tikra darbo dalis virsta šiluma.

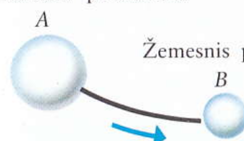
Atliktas darbas išreiškiamas elektros krūvio ir potencialų skirtumo sandauga: $A = qU$. Kadangi $q = \frac{I}{t}$, tai srovės stiprio ir potencialų skirtumo sandauga lygi lauko atlikto darbo ir laiko, reikalingo tam darbui atlikti, santykiui: $UI = \frac{A}{t}$. Šis santykis apibūdina galią P, kuri laidininke virsta šiluma: $P = UI$. Potencialų skirtumas matuojamas voltais (V), o srovės stipris — amperais (A), todėl galios matavimo vienetas yra 1 V · A. Jis vadinamas *vatu* (W): 1 W = 1 V · 1 A. Vietoj U įrašę IR (čia R — laidininko varža), gauname galios ir laidininko varžos sąryšį: $P = I^2R$.

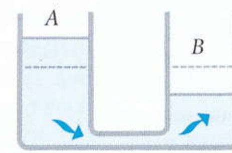
Daugybe bandymų realizuodamas vienos rūšies energijos virsmą kitos rūšies energija, Dž. P. Džaulis pirmasis įrodė, kad elektros srovės sukurta šiluma yra tiesiog proporcinga srovės stiprio kvadratui.

Elektros srovė ir galia

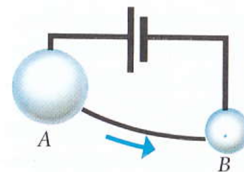


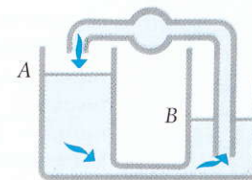
1. Elektros krūvis, pratekėjęs laidininko skerspjūviu per vieną sekundę, nusako elektros srovės stiprį (a), analogiškai vandens kiekis, pratekėjęs vamzdžio skerspjūviu, — vandens srauto stiprį (b)



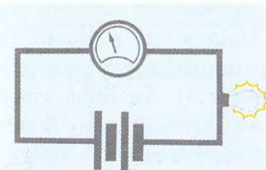


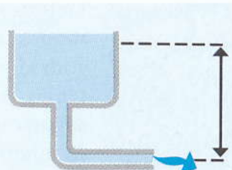
2. Elektros srovės ir vandens srauto pusiausvyros būsena. Elektros srovė teka iš A į B tol, kol jų potencialai susilygina. Vanduo teka iš A į B tol, kol vandens lygis abiejuose induose pasidaro vienodas

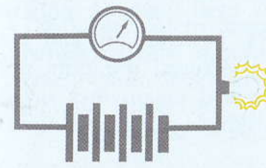


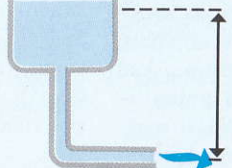


3. Generatoriaus ir vandens siurblio palyginimas. Generatorius palaiko pastovų potencialų skirtumą, o vandens siurblys — pastovų vandens lygių skirtumą

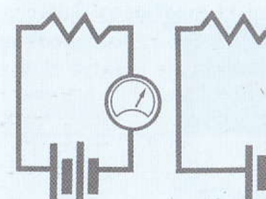


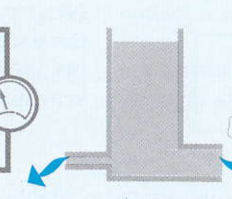






4. Potencialų skirtumo ir vandens stulpelių aukščių skirtumo palyginimas. Didėjant potencialų skirtumui, stiprėja elektros srovė (kairėje), didėjant vandens lygių skirtumui, stiprėja vandens srautas (dešinėje)





5. Elektrinė varža ir vamzdžio skersmuo: laidininko varžai padidėjus dvigubai, srovės stipris tame laidininke sumažėja perpus (kairėje), platus (didelio skersmens) vamzdis mažiau priešinasi vandens srauto tekėjimui negu siauras (mažo skersmens), todėl juo teka didesnis vandens srautas (dešinėje)

Magnetizmas

Natūralieji magnetai

Dar senovėje žmonės pastebėjo, kad gamtoje pasitaiko akmenų, traukiančių vienas kitą. Jie vadinami *magnetitais* arba *natūraliaisiais magnètais*. Taip pat buvo nustatyta, kad tokia savybė būdinga mažiems geležies, kobalto, nikelio ir kitų panašių medžiagų gabalėliams.

Medžiagų savybė traukti viena kitą (*magnetizmas*) negali išnykti kaip elektra, sukurta trinant vieną kūną į kitą. Magnetizmas yra pastovi medžiagos savybė. Plieno gabalėlis, grūdinimo metu veikiamas magneto, įgyja magnetinių savybių, t. y. pats virsta magnetu. Atskirtas nuo magneto, jis išlaiko šias savybes, taigi tampa *nuolatiniu magnetù*.

Kompaso rodyklė yra ne kas kita, kaip maža magnetinė rodyklė (magnetėlis), galinti laisvai sukiotis apie savo ašį. Jau seniai buvo nustatyta, kad magnetinė rodyklė (kai šalia jos nėra kitų medžiagų, turinčių magnetinių savybių) Žemės paviršiaus atžvilgiu įgyja tam tikrą padėtį — iš pietų į šiaurę. Į šiaurę nukrypstantis jos galas vadinamas magneto šiauriniu poliumi, o nukrypstantis į pietus — pietiniu poliumi. Nuolatinis magnetas analogiškas kompasui, taigi kiekvienas magnetas turi vieną šiaurinį ir vieną pietinį polių.

Priartinę magneto pietinį polių prie kompaso rodyklės pietinio poliaus, matysime, kad jie vienas kitą stumia, tuo tarpu artindami magneto šiaurinį polių prie kompaso rodyklės pietinio poliaus, įsitikinsime, kad jie traukia vienas kitą (magneto poliai — tai vietos, kuriose labiausiai reiškiasi magnetinės traukos ir stūmos jėgos). Apibendrindami galime sakyti, kad *vienavardžiai magneto poliai vienas kitą stumia, o įvairiavardžiai — traukia* (→ 1).

Kompaso magnetinės rodyklės šiaurinis polius (rodantis šiaurę) iš tikrųjų yra nukreiptas į Žemės pietinį polių, esantį netoli geografinio šiaurės ašigalio (→ 2). Tai, kad kompaso rodyklė bet kuriame Žemės paviršiaus taške visada nukrypsta šiaurės—pietų kryptimi, mums patvirtina, jog dėl Žemės magnetinių savybių aplink ją susidaro magnetinis laukas, taip pat kaip dėl jos masės — gravitacijos laukas. Apskritai kiekviename erdvės taške, kuriame kompaso rodyklę veikia traukos ar stūmos jėgos, yra magnetinis laukas. Kai kompaso rodyklės neveikia pašalinės jėgos, Žemės magnetiniame lauke ji yra orientuota šiaurės—pietų kryptimi.

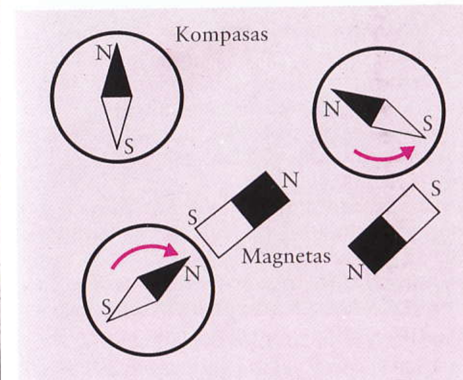
Jei prie kompaso rodyklės priartiname magnetą, rodyklė pasisuka. Aplink ją susidaro laukas, kuris yra magneto ir Žemės sukurtas atstojamasis magnetinis laukas (→ 3). Taigi kompaso rodyklė yra tinkama priemonė magnetinių jėgų veikimo kryptims nustatyti. Norint ištirti magnetinį lauką ir nubrėžti jo jėgų linijas, pakanka padėti kompasą įvairiuose taškuose ir taip sužinoti lauko kryptį tuose taškuose.

Geležies drožlės, papiltos ant kartono, magneto sukurtame lauke virsta magnetinėmis rodyklėmis ir orientuojasi pagal magnetinio lauko jėgų linijas (→ 4). Tų linijų visuma sudaro magneto *magnetinio lauko spektrą*. Magnetinio lauko jėgų linijos yra nukreiptos iš šiaurinio poliaus į pietinį.

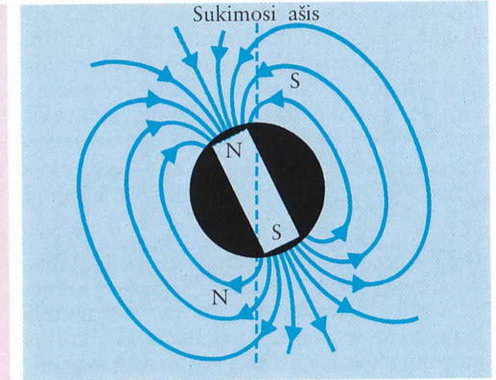
Magneto savybės nesikaupia tik poliuose. Suskaldę magnetą, pastebėsime, kad kiekviena jo dalis turi šiaurinį ir pietinį polių (→ 5). Tai rodo, kad magnetinės savybės yra vienodai pasiskirsčiusios visoje medžiagoje.

Vienas izoliuotas polius egzistuoti negali. Netgi pati mažiausia medžiagos dalelė turi tas pačias savybes, kaip ir visa medžiaga, nes jas sukuria medžiagoje esantys elektros krūvininkai.

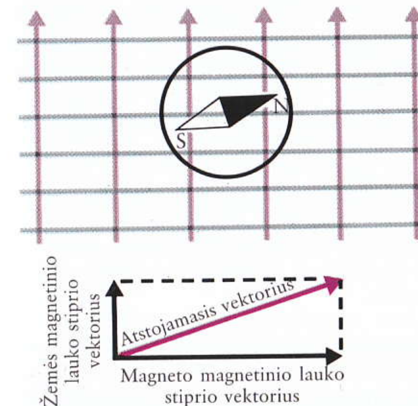
Natūralieji magnetai



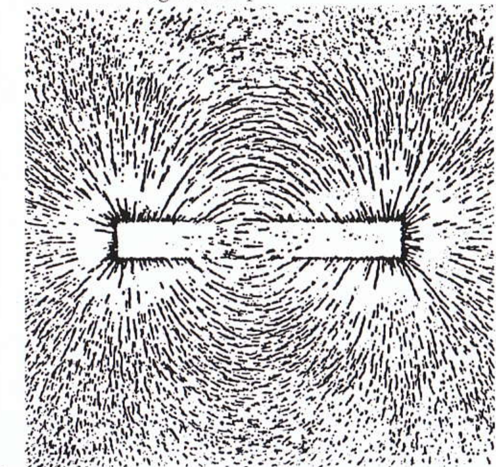
1. Vienavardžiai poliai vienas kitą stumia, o įvairiavardžiai — traukia



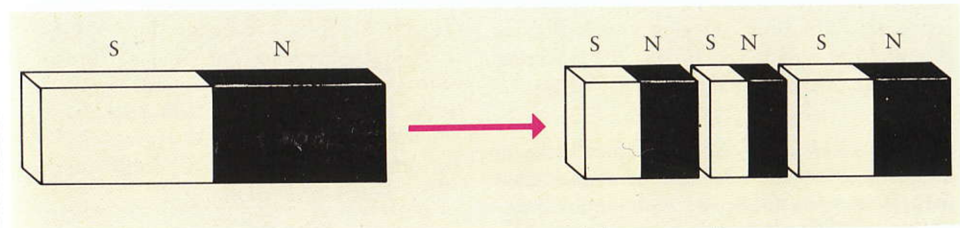
2. Žemės magnetinis laukas panašus į strypinio magneto magnetinį lauką. Žemės magnetinio lauko poliai yra priešingo geografiniams ašigaliams pavadinimo



3. Veikiama keleto magnetinių laukų, magnetinė rodyklė orientuojasi atstojamojo magnetinio lauko kryptimi (Žemės magnetinio lauko jėgų linijos yra juodos, magneto — rausvos)



4. Geležies drožlės rodo strypinio magneto sukurto lauko jėgų linijas



5. Kiekviena suskaldyto magneto dalis yra naujas magnetas

Magnetinės jėgos

Du krūvininkus, judančius vienas kito atžvilgiu, veikia ne tik Kulono jėga (žr. p. 40), bet ir dar viena jėga, vadinama *magnetine jėga*. Norint sužinoti jėgą, kuria išreiškiama kitų krūvininkų įtaka bandomajam krūvininkui q, reikia apibrėžti tų krūvininkų sukuriamo elektrinio lauko stiprį $\vec{E}$ taške, kuriame yra krūvininkas q. Tada jėga bus lygi

$$\vec{F} = q\vec{E}.$$

Dabar pabandykime apibrėžti dydį $\vec{B}$, apibūdinantį judančių krūvininkų sistemos sukurtą magnetinį lauką. Juk būtent magnetinis laukas yra pagrindinė priežastis, dėl kurios atsiranda jėgos, veikiančios judantį krūvininką arba kompaso magnetinę rodyklę.

Kompaso rodyklė, padėta netoli laidininko, kuriuo teka elektros srovė, nukrypsta statmenai tam laidininkui (→ 1). Tai rodo, kad srovės sukurto magnetinio lauko stipris yra statmenas laidininkui. Plokštumoje, statmenoje srovės tekėjimo krypčiai, magnetinio lauko jėgų linijos yra koncentriniai laidininko atžvilgiu apskritimai (t. y. tų apskritimų centrai yra viename taške; → 2).

Taigi nustatėme akivaizdų ryšį tarp elektros srovės ir magnetinio lauko.

Patyrinėkime apskritu laidu (vija) tekančios srovės sukurtą lauką. Padėję vijos centre kompaso rodyklę, matysime, kad ji pasisuks vijos ašies kryptimi. Srovės sukurtas laukas bus toks pat, kaip strypinio magneto, padėto vijos ašyje (→ 3). Vija, kuria teka srovė, ir strypinis magnetas sukelia tuos pačius efektus.

Magnetinės jėgos kryptis

Sakykime, teigiamasis krūvininkas q pralekia pro magnetinio lauko tašką P greičiu $\vec{v}$. Magnetinis laukas veikia tą krūvininką jėga, statmena jo judėjimo krypčiai. Jeigu krūvininko greičio ir per tašką P einančios jėgų linijos kryptys sutampa, tai krūvininką veikianti jėga lygi nuliui, jei greitis statmenas lauko jėgų linijoms, tai jėga yra didžiausia ir nukreipta statmenai $\vec{v}$ bei $\vec{B}$. Ji tiesiog proporcinga sandaugai $q\vec{v}$ (→ 4). Taigi

$$\vec{F} = q\vec{v}\vec{B};$$

čia $\vec{B}$ — vektorius, kurio kryptis kiekviename lauko taške sutampa su atitinkamos jėgų linijos kryptimi. Jis vadinamas *magnetine indukcija* ir matuojamas *teslomis* (T).

Magnetinė jėga, veikianti laidininką

Imkime tiesų laidininką, orientuotą statmenai magnetinei indukcijai $\vec{B}$. Žinome, kad elektros srovė yra kryptingas krūvininkų (elektronų) judėjimas, o kiekvieną judantį krūvininką magnetiniame lauke veikia jėga $F = Bqv$, statmena lauko indukcijai bei krūvininko judėjimo greičiui, taigi ir tekančios srovės krypčiai.

Jei n yra laidininko vienetinio tūrio dalyje esančių elektronų skaičius, l — laidininko ilgis, S — jo skerspjūvio plotas, tai lS bus to laidininko tūris, o nlS — jame esančių elektronų skaičius. Kadangi kiekvieną elektroną, kurio krūvis e, veikia jėga

$$\vec{F} = e\vec{v}\vec{B},$$

tai visą laidininką veikianti jėga $F = nlSevB$ (v — elektronų vidutinis greitis). Laiko tarpas, kurio reikia elektronui įveikti nuotolį l, yra $t = \frac{l}{v}$. Taigi per šį laiko tarpą laidininko skerspjūviu prateka krūvis $nlSe$. Padaliję jį iš t, apskaičiuojame srovės stiprį:

$$I = \frac{nlSe}{\frac{l}{v}} = \frac{nlSev}{l} = nSev.$$

Jėgos išraiškoje vietoj $nSev$ įrašę I, gauname: $F = SnlevB = IBl$. Ši jėga yra statmena laidininkui ir magnetinio lauko indukcijai. Jos kryptį (→ 5) nusako dešininio sraigto taisyklė.

Magnetinė jėga, veikianti viją ir solenoidą

Sakykime, stačiakampė vija (jos kraštinės a ir b) yra magnetiniame lauke, kurio indukcija $\vec{B}$ statmena ilgio a vijos kraštinėms (→ 6). Vija gali suktis apie ašį, statmeną toms kraštinėms. Kraštines a veikiančios jėgos sudaro jėgų dvejetą, kurio magnetinis momentas lygus

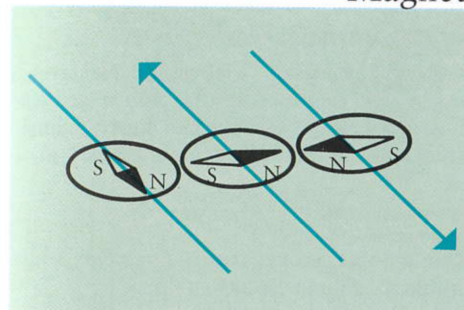
$$Blab \sin \varphi;$$

čia φ — kampas tarp magnetinės indukcijos $\vec{B}$ ir statmens vijos plokštumai (normalės vektoriaus $\vec{n}$). Jėgas, veikiančias ilgio b kraštines, atsveria sukimosi ašies reakcija.

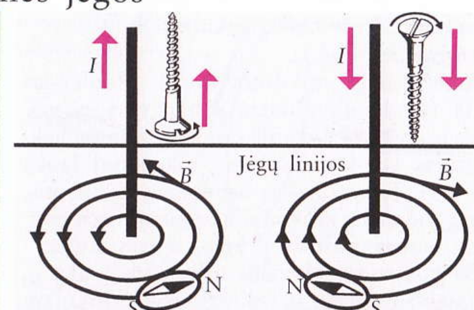
Solenoidas sudarytas iš N lygiagrečių vijų, kuriomis teka ta pati srovė. Taigi solenoidą veikia *magnetinis momentas*

$$M = NBlab \sin \varphi.$$

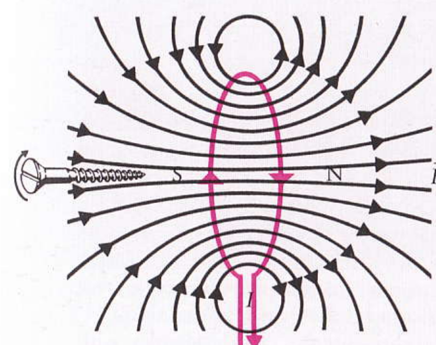
Magnetinės jėgos



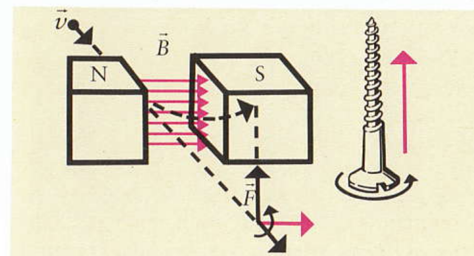
1. Tekėdama laidininku, elektros srovė sukuria magnetinį lauką, kuris kompaso rodyklę pasuka statmenai laidininkui



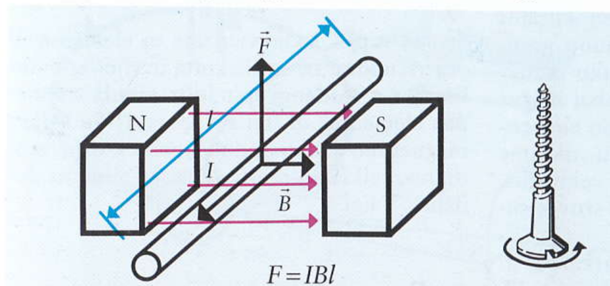
2. Laidininku tekančios srovės sukurto magnetinio lauko jėgų linijos yra koncentriniai apskritimai, esantys laidininkui statmenoje plokštumoje. Jėgų linijų kryptis nusakoma dešininio sraigto taisykle



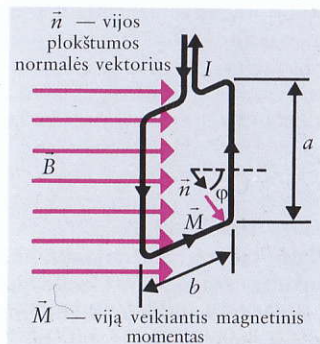
3. Apskrita vija kuria tokį pat lauką, kaip ir strypinis magnetas, padėtas tos vijos ašyje



4. Teigiamąjį krūvininką, judantį statmenai magnetinio lauko jėgų linijoms, veikia jėga, statmena tiek lauko indukcijai, tiek krūvininko judėjimo krypčiai. Jos modulis $F = qvB$, o kryptis nusakoma dešininio sraigto taisykle



5. Ilgio l laidininką, kuriuo teka elektros srovė, magnetinis laukas veikia jėga, statmena plokštumai, kurioje yra laidininkas ir magnetinio lauko indukcijos vektorius $\vec{B}$



6. Viją, kuria teka elektros srovė, veikiantis magnetinis momentas

Magnetiniai laukai

Judančio krūvininko sukurtas magnetinis laukas

Amerikiečių mokslininkas H. Roulendas (H. Rowland), atlikdamas bandymą, pirmasis įrodė, kad judantis elektrostatiškai įelektrintas sluoksnis sukuria magnetinį lauką (→ 1). Tai geriausias bandymas, įtikinantis, jog judančių krūvininkų sukurtas magnetinis laukas atitinka elektros srovės lauką.

Be įrodymo pateikiame tokią krūvininko q, judančio greičiu v, sukurto magnetinio lauko indukcijos vertę taške P, nutolusiame nuo to krūvininko atstumu r:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{qv\sin\varphi}{r^2};$$

čia φ — kampas, kurį sudaro greičio vektorius ir linija, jungianti krūvininką q su tašku P, kuriame skaičiuojama indukcija; μ_0 — magnetinė vakuumo skvarba (dar vadinama *magnetine konstanta)*; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m. Lauko jėgų linijos, esančios plokštumoje α, einančioje per tašką P, yra statmenos krūvininko greičio vektoriui. Tos linijos — apskritimai, orientuoti pagal dešininio sraigto, judančio greičio $\vec{v}$ kryptimi, taisyklę (→ 2). Kai judantis krūvininkas yra neigiamasis, lauko jėgų linijos orientuotos priešinga kryptimi (→ 3).

Srovės elemento sukurtas magnetinis laukas

Šio puslapio viršuje pateikta formulė padeda įvertinti atskirų srovės elementų, į kuriuos ji gali būti padalyta, indėlį kuriant magnetinį lauką. Norint apskaičiuoti grandine tekančios srovės sukurto lauko indukciją, reikia grandinę padalyti į labai mažus elementus ir apskaičiuoti kiekvieno elemento sukurto lauko indukciją tam tikrame taške. Sudėjus tuos indukcijos vektorius, randama visa grandine tekančios srovės sukurto lauko indukcija.

Kaip sakyta, maža laidininko atkarpa dl sukuria magnetinio lauko indukciją $d\vec{B}$ (→ 4). Jei laidininko vienetinio tūrio dalyje yra n laisvųjų elektronų, tai ilgio dl atkarpoje jų bus $nSdl$ (S — laidininko skerspjūvio plotas). Kiekvienas elektronas atstumu r nuo dl ilgio atkarpos sukurs savo lauką, kurio indukcija bus lygi $\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{ev\sin\varphi}{r^2}$.

Kadangi praktiškai kiekvienas elektronas yra beveik vienodai nutolęs nuo nagrinėjamosios atkarpos, tai visų jų sukurto magnetinio lauko indukcija atstumu r bus lygi

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{nSdlev\sin\varphi}{r^2}.$$

Kaip žinome, srovės stipris $I = nSev$, todėl indukciją galima išreikšti taip:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Idl\sin\varphi}{r^2}.$$

Apskrita vija tekančios srovės magnetinis laukas

Apskaičiuokime magnetinio lauko indukciją apskritos vijos, kuria teka elektros srovė, centre. Imkime bet kokį labai mažą (ilgio dl) tos vijos elementą. Elemento dl sukurto magnetinio lauko indukcija $d\vec{B}$ vijos centre, taške P, yra statmena vijos plokštumai α (→ 5). Kad ir koks būtų elementų dl ilgis, visų jų sukurto lauko indukcija $d\vec{B}$ taške P turėtų tą pačią kryptį. Visų elementų sukurto magnetinio lauko indukcijos vektorių suma yra tos pačios krypties vektorius, kurio modulis lygus sudedamųjų vektorių modulių sumai. Taigi pakanka sudėti visų elementų magnetinio lauko indukcijos modulius

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Idl\sin\varphi}{r^2}.$$

Srovės stipris I kiekviename tų elementų dl yra vienodas, be to, nekinta ir vijos spindulio ilgis r. Kadangi spindulys visada statmenas elementui dl, tai $\sin\varphi = 1$. Sudedant magnetinio lauko indukcijos vektorių modulius, reikia atkreipti dėmesį į minėtus dydžius. Taigi

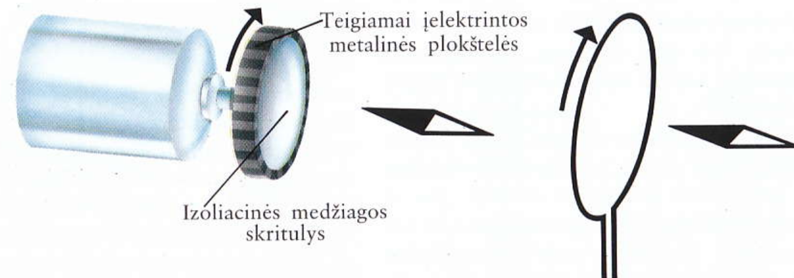
$$B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I}{r^2}\Sigma dl;$$

čia Σ — sumos ženklas.

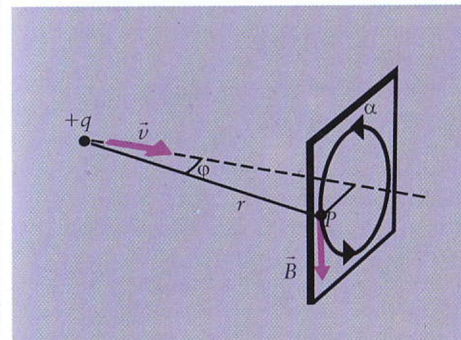
Visų elementų ilgių dl suma yra apskritimo ilgis $2\pi r$, todėl

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I}{r^2}2\pi r = \mu_0\frac{I}{2r}.$$

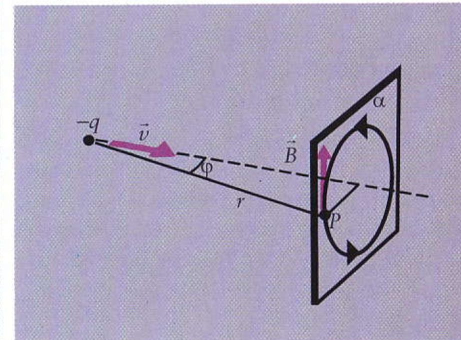
Magnetiniai laukai



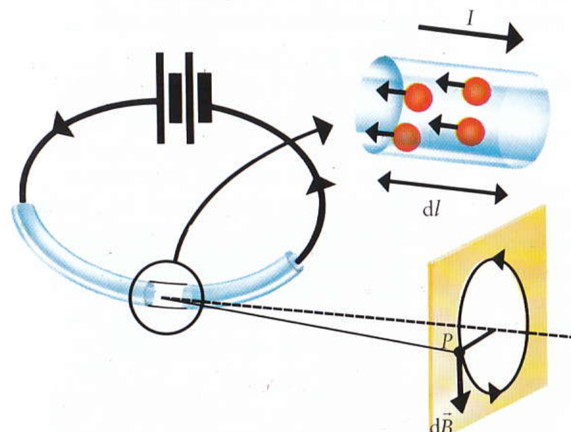
1. Magnetinį lauką kuria judantis krūvininkas. Elektrostatiškai įelektrintas skritulys sukdamasis sukuria tokį pat magnetinį lauką, kaip ir elektros srovė, tekėdama laidininko vija



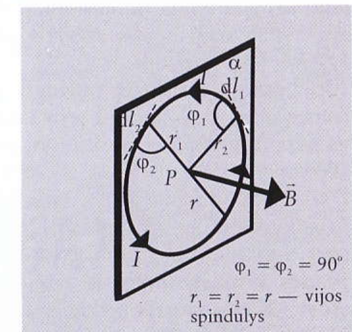
2. Judantis teigiamasis krūvininkas taške P sukuria magnetinį lauką, kurio indukcija $\vec{B}$



3. Judantis neigiamasis krūvininkas taške P sukuria magnetinį lauką, kurio indukcija $\vec{B}$



4. Ilgio dl elementas, kuriuo teka elektros srovė, sukuria taške P magnetinį lauką, kurio indukcija $d\vec{B}$



5. Apskrita vija, kuria teka elektros srovė. Vijos centre magnetinio lauko indukcijos vektorius yra statmenas vijos plokštumai, o jo modulis lygus $B = \mu_0\frac{I}{2r}$

Elektromagnetinė indukcija

Elektromagnetine indukcija vadinamas toks reiškinys, kai tam tikromis aplinkybėmis magnetiniai laukai sukuria elektros srovę grandinėje.

Sakykime, kad magnetiniame lauke turime paviršių, kurio plotas *S*. *Magnetinis srautas*, arba *magnetinės indukcijos srautas*, pro tą paviršių išreiškiamas magnetinės indukcijos vektoriaus $\vec{B}$ projekcijos paviršiaus normalėje ir to paviršiaus ploto *S* sandauga (→ 1). Kampą tarp $\vec{B}$ ir paviršiaus normalės pažymėję raide φ, magnetinės indukcijos srautą Φ pro tą paviršių galėsime išreikšti formule

$$\Phi = BS \cos \varphi .$$

Kai magnetinė indukcija statmena paviršiui,

$$\Phi = BS.$$

Iš čia aišku, kodėl nejudantis magnetas (→ 2), kurdamas erdvėje magnetinį lauką, sudaro pastovų magnetinį srautą pro visas ritės vijas. Artinant magnetą prie ritės (→ 2b), magnetinės indukcijos $\vec{B}$ vertė visuose vidiniuose ritės taškuose didėja, drauge stiprėja ir srautas Φ. Tolinant magnetą (→ 2c), magnetinės indukcijos $\vec{B}$ vertė mažėja, taigi silpnėja ir magnetinis srautas ritėje.

Ir vienu, ir kitu atveju rite teka elektros srovė, kuri vadinama *indukuotąja elektros srove*; abiem nagrinėtais atvejais jos tekėjimo kryptis yra skirtinga.

Ritės atžvilgiu sukeitę magneto polius vietomis, pamatysime, kad srovė teka priešinga kryptimi nei 2 paveiksle, b, pavaizduotu atveju.

Dvi rites padėkime vieną šalia kitos. Vieną jų sujunkime su srovės šaltiniu, kitą — su srovės matuokliu. Pirmąja rite tekanti srovė pradės kisti ir antrojoje ritėje indukuosis srovė, kurios stipris priklausys ne nuo srovės stiprio pirmojoje ritėje, o nuo jo kitimo spartos (→ 3).

Jei srovės stipris pirmojoje ritėje nekis, tai antrąja rite srovė netekės.

Apibendrindami tai, kas pasakyta, galime teigti, kad kiekvienas magnetinio srauto pokytis grandinėje indukuoja elektros srovę.

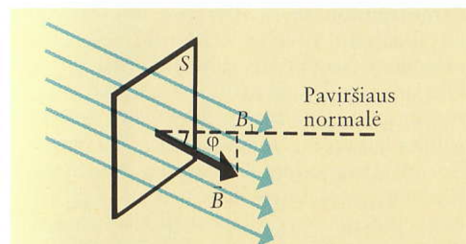
Šis reiškinys ir vadinamas *elektromagnetine indukcija*.

Esminis jo požymis nusakomas *Lenco dėsniu*: indukuotoji elektros srovė sukuria magnetinį lauką, kuris priešinasi ją kuriančio lauko kitimui (→ 2b).

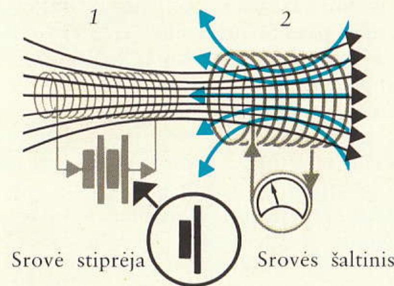
Prie ritės artinant magneto šiaurinį polių, magnetinis laukas ritėje, taigi ir magnetinis srautas pro ją, stiprėja. Ritėje indukuojasi srovė, kuri sukuria priešingos krypties srautą, mat jos sukurtas laukas priešinasi magneto sukurto lauko kitimui, t. y. srauto stiprėjimui. Kitaip tariant, galima sakyti, kad indukuotoji srovė arčiausiai magneto esančiame ritės gale sukuria šiaurinį polių, todėl jis stumia magnetą, taip priešindamasis jo artinimui (srovės indukcijos padarinys; → 2c). Magneto šiaurinį polių tolinant nuo ritės, indukuojasi priešingos krypties srovė, kuri reiškiasi kaip traukos jėga, taigi priešinasi magneto šiaurinio poliaus tolinimui (srovės indukcijos padarinys). Tekėdama grandine, srovė, kaip žinome, išsklaido iš išorės (pavyzdžiui, iš generatoriaus) gautą energiją.

Indukuotosios srovės atveju energiją tiekia magnetinis laukas, esantis aplink grandinę. Iš tikrųjų kiekviename magnetiniame lauke turime atitinkamu tankiu pasiskirsčiusią energiją (energiją, tenkančią vienetiniam tūriui), kuri kiekviename lauko taške lygi $\frac{B^2}{2\mu}$; čia *B* — magnetinė indukcija tame taške, μ — aplinkos charakteristika (*magnetinė skvarba*). Magnetinė vakuumo skvarba paprastai žymima μ_0. Iš išorės paimta energija, verčianti judėti elektros krūvininkus, vadinama *indukcine elektrovara*. M. Faradėjus (M. Faraday) įrodė, kad grandinėje indukuota elektrovara lygi magnetinio srauto, kertančio grandinę, kitimo greičiui. Jei per labai trumpą laiko tarpą d*t* tas magnetinis srautas padidėja dydžiu dΦ, tai indukcinė elektrovara lygi $-\frac{d\Phi}{dt}$. Minuso ženklas rodo, kad, pagal Lenco dėsnį, indukcinė elektrovara priešinasi srauto, kuris ją sukūrė, kitimui.

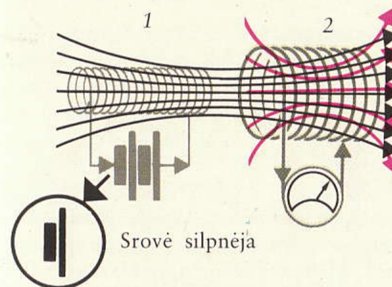
Elektromagnetinė indukcija

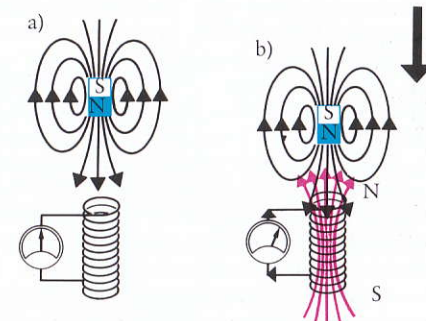


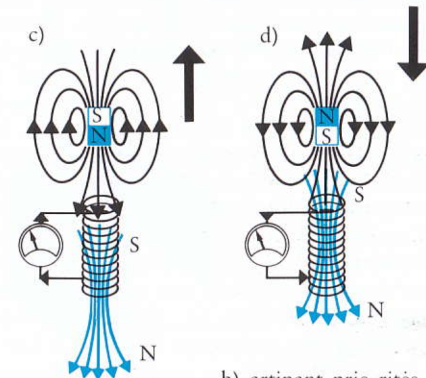
1. Magnetinės indukcijos srautas, veriantis ploto *S* paviršių, yra Φ = *BS* cos φ

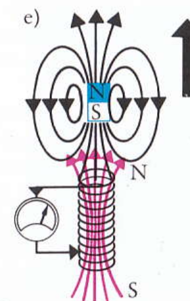


3. Stiprėjant elektros srovei *1* ritėje, *2* ritėje indukuojasi srovė, kuri sukuria magnetinį lauką priešingos krypties tam laukui, kuris sukūrė tą srovę (viršuje). Srovei *1* ritėje silpnėjant, indukuojasi toks magnetinis laukas, kuris sumuojasi su indukuotu lauku (apačioje)







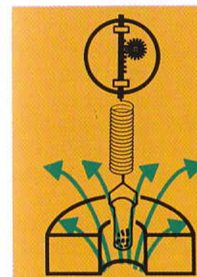


2. Ritėje indukuota srovė:
a) greta ritės esantis nejudantis magnetas nesukuria srovės ritėje;
b) artinant prie ritės magneto šiaurinį polių, ritėje indukuota srovė sukuria magnetinį lauką, kuris yra nukreiptas taip, kad priešintųsi magneto artėjimui;
c) magnetą tolinant nuo ritės, indukuotoji srovė teka priešinga kryptimi, priešindamasi magnetinės indukcijos srauto mažėjimui ritėje;
d) artinant prie ritės magneto pietinį polių, ritėje indukuota srovė sukuria magnetinį lauką, kuris yra nukreiptas magneto pietinio poliaus kryptimi;
e) magnetą tolinant nuo ritės, srovės kryptis ritėje pasikeičia priešinga

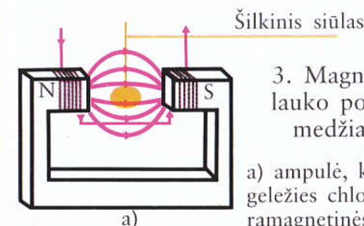
Medžiagos magnetinės savybės

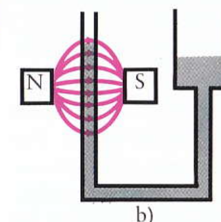
Sakykime, turime ritę, kuri sukuria stiprų magnetinį lauką (→ 1), ir norime sužinoti, ar į jos lauką patekusius įvairius kūnus veikia kokia nors jėga.
Pirmiausia pastebime, kad visas medžiagas galima suskirstyti į tris rūšis: *diamagnetines medžiagas*, silpnai stumiamas magnetinio lauko (prie šių medžiagų priskiriamas vanduo, švinas, grafitas; → 2); *paramagnetines medžiagas*, silpnai traukiamas lauko (natris, aliuminis, geležies chlorido kristalai; → 3); *feromagnetines medžiagas*, stipriai traukiamas lauko (geležis, kobaltas, nikelis; → 4). Norint sužinoti tokių skirtumų priežastis, reikia šias medžiagas mikroskopiškai ištirti ir įvertinti jų magnetines savybes. Susmulkinę iš kokios nors medžiagos padarytą kūną, matysime, jog kiekviena jo dalis turi tos medžiagos savybių. Dar labiau smulkindami, galėtume gauti tokias mažas daleles, kurios nebeturėtų pirminių medžiagos savybių. Mažiausia medžiagos dalis, dar išlaikanti pirminę tos medžiagos savybę, yra *molekulė*. Ji susideda iš judančių elektringųjų dalelių. Judėdama ratu, tokia dalelė sudaro srovės žiedą, kuris, kaip yra nustatyta, kuria magnetinį momentą $\vec{M}$. Kai vieni molekulės krūvininkai juda viena kryptimi, o kiti — priešinga kryptimi, jų magnetiniai momentai kompensuoja vienas kitą ir molekulė neįgyja savo magnetinio momento. Tai — diamagnetinės medžiagos molekulės.
Žinome, kad kiekvienas krūvininkas yra lydimas kito, judančio priešinga pirmajam kryptimi. Išorinis magnetinis laukas tuos krūvininkus veikia lygiai taip pat, kaip ir dvi vijas, kuriomis srovė teka priešingomis kryptimis, todėl priešingų krypčių jėgų dvejetas suka vijas priešinga kryptimi.
Dėl išorinio magnetinio lauko poveikio magnetiniai momentai mažiau kompensuojasi — atsiranda kompleksinis magnetinis momentas. Molekulė įgyja tokį poliškumą, kad gali atstumti išorinį magnetinį lauką. Didelė dalis neorganinių junginių ir beveik visi organiniai junginiai yra diamagnetiniai; diamagnetizmas — kiekvieno atomo ar molekulės savybė. Priešingas reiškinys stebimas tik tada, kai diamagnetizmas yra įveikiamas kito, stipresnio, reiškinio, sukeliančio magnetinę trauką. Paramagnetinėse medžiagose dėl krūvininkų judėjimo sukeltų reiškinių magnetiniai momentai kompensuojami ne visiškai, todėl kiekviena molekulė turi savo nedidelį magnetinį momentą. Iš tikrųjų kiekvieną molekulę galima laikyti mažu magnetėliu. Kai neveikia išorinis magnetinis laukas, paramagnetinių medžiagų molekulės juda netvarkingai (šiluminis judėjimas), todėl atstojamasis magnetinis momentas lygus nuliui ir medžiaga neturi magnetinių savybių (→ 5).
Patekusios į magnetinį lauką, tokios molekulės orientuojasi jame kaip mažos kompasų rodyklėlės; jos sukuria magnetinį lauką, kurio indukcija yra tokios pat krypties, kaip ir išorinio lauko (→ 6). Kartais paramagnetizmas, pavyzdžiui, metalų, yra vos vos stipresnis už diamagnetizmą, tačiau, mažėjant temperatūrai, paramagnetinis efektas stiprėja (kaip antai geležies chlorido). Kai temperatūra yra žema, medžiagos dalelės juda lėčiau, taigi jų magnetizmui sukurti pakanka nestipraus išorinio lauko.
Paramagnetizmo ryškėjimas krintant medžiagos temperatūrai iš dalies susijęs su didele jėga, kuri atsiranda, pavyzdžiui, skystame deguonyje (→ 3b). Tas faktas, kad feromagnetinės medžiagos įsimagnetina kaip paramagnetikai, rodo, jog egzistuoja molekuliniai magnetai, kurie orientuojasi netgi tada, kai nėra išorinio magnetinio lauko. Pavyzdžiui, feromagnetinio kristalo įmagnetėjimo kryptis yra susijusi su medžiagos kristaline sandara (→ 7). Feromagnetinės medžiagos turi zonų, kuriose daugelis molekulių orientuotos vienodai. Tos zonos, vadinamos *Veiso domenais*, matomos pro mikroskopą.
Jei feromagnetinę medžiagą įdėsime netgi į silpną magnetinį lauką, tai domenai, kurių įmagnetėjimo kryptis atitinka išorinio magnetinio lauko kryptį, plės įtraukdami artimesnius domenus. Sakoma, kad *magnetinė sotis* pasiekiama tada, kai susidaro vienas domenas, kurio įmagnetėjimo kryptis yra tokia pat, kaip išorinio lauko. *Nuolatiniais magnetais* vadinamos feromagnetinės medžiagos, kuriose šis įmagnetėjimas išlieka netgi tada, kai pašalinamas išorinis magnetinis laukas.

Medžiagos magnetinės savybės



1. Jėgos, kuri veikia magnetiniame lauke esantį kūną, didumas ir kryptis priklauso nuo to kūno medžiagos savybių

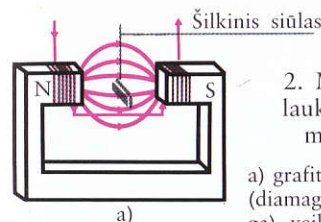


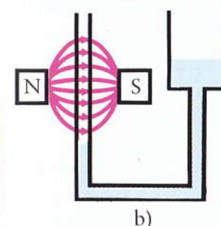


3. Magnetinio lauko poveikis medžiagai:

a) ampulė, kurioje yra geležies chlorido (paramagnetinės medžiagos), orientuojasi magnetiniame lauke taip pat, kaip geležies strypelis;

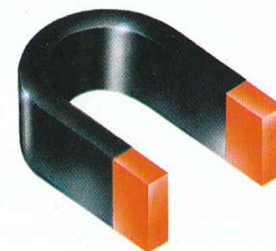
b) skystasis deguonis (90 K temperatūros jis yra paramagnetikas), veikiamas magnetinio lauko, vamzdeliu pakyla aukštyn



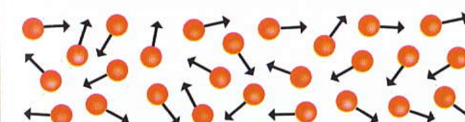


2. Magnetinio lauko poveikis medžiagai:

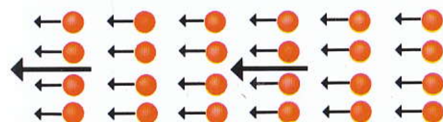
a) grafito strypelis (diamagnetinė medžiaga), veikiamas elektromagneto polių, orientuojasi statmenai magnetinio lauko jėgų linijoms;
b) vanduo (diamagnetinė medžiaga), veikiamas magnetinio lauko, vamzdeliu nusileidžia žemyn



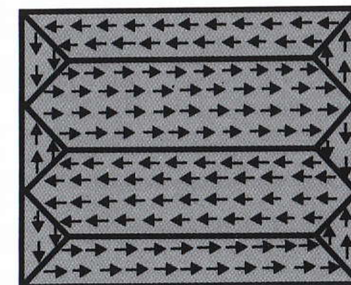
4. Magnetas traukia geležinę vinį (feromagnetinę medžiagą) ir ją įmagnetina



5. Kai paramagnetinės medžiagos neveikia išorinis magnetinis laukas, jos molekulės juda netvarkingai



6. Veikiamos išorinio magnetinio lauko, medžiagos molekulės orientuojasi to lauko kryptimi, ir medžiaga įsimagnetina



7. Veiso domenai feromagnetiniame kristale

Elektrinio ir magnetinio lauko įtaka judančioms elektringosioms dalelėms

Elektringųjų dalelių judėjimo elektriniame bei magnetiniame lauke tyrimas vadinamas *elektronine balistika*. Ji turi bendrų dalykų su klasikine balistika.

Gamtoje esti įvairių elektringųjų dalelių, pavyzdžiui, elektronų, protonų, alfa dalelių. Visos jos yra tokios mažos, kad gali būti laikomos taškinėmis. Tai leidžia supaprastinti tyrimą.

Elektringosios dalelės judėjimas elektriniame lauke

Elektringąją dalelę, kurios krūvis q, o masė m, stiprio $\vec{E}$ elektrinis laukas veikia jėga $q\vec{E}$. Tos jėgos kryptis sutampa su elektrinio lauko stiprio kryptimi arba yra jai priešinga: kai dalelės krūvis teigiamas, jėga yra tos pačios krypties, kaip ir elektrinio lauko stipris, kai neigiamas — priešingos krypties.

Tokia jėga suteikia dalelei pagreitį $\vec{a}$. Kadangi dalelės masė lygi m, tai

$$q\vec{E} = m\vec{a}, \text{ arba } \vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m}.$$

Jei elektrinio lauko stiprio kryptis ir modulis yra vienodi visuose to lauko taškuose, t. y. jei laukas yra vienalytis (toks laukas susidaro, pavyzdžiui, tarp kondensatoriaus plokščių), tai kiekviename taške dalelė įgyja tokį pat pagreitį (→ 1).

Kai elektringoji dalelė, turinti pradinį greitį, lekia iš taško A į tašką B nelygiagrečiai su jėgų linijomis, jos kinetinės energijos prieaugis lygus potencinės energijos pokyčiui $q(\varphi_B - \varphi_A)$. Iš šio teiginio išplaukia dar vienas energijos matavimo vienetas, vadinamas *elektronvoltu* (eV). 1 eV — tai energija, kurią įgyja elektronas, pereidamas iš vieno taško į kitą, kai tų taškų potencialų skirtumas 1 V. Kadangi elektrono krūvis lygus $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, tai 1 eV = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J.

2 paveiksle pavaizduotas elektroninis spindulys (elektronų pluoštas, turintis tam tikrą pradinį greitį), sklindantis statmenai elektrinio lauko jėgų linijoms. Matome, kad elektriniame lauke jis nukrypsta nuo tiesiaeigio sklidimo krypties.

3 paveiksle — oscilografo elektroninio vamzdžio schema. Vamzdį sudaro stiklinis paplatintas viename gale balionas, iš kurio išsiurbtas beveik visas oras. Siaurajame vamzdžio gale įtaisytas katodas, skleidžiantis elektronus (dėl termoelektroninės emisijos). Išlėkę iš katodo, jie pagreitinami ir sufokusuojami specialiais elektrodais (anodais), kurie kartu su katodu sudaro elektronų prožektorių. Po to elektronai pralekia pro dvi tarpusavyje statmenas poras plokščių, vadinamų *kreipimo plokštėmis*, ir atsitrenkia į platųjį vamzdžio galą (ekraną), padengtą plonu švytinčios medžiagos sluoksniu.

Kai kreipimo plokštės neprijungtos prie įtampos šaltinio (tarp jų nėra elektrinio lauko), elektronų pluoštas nenukrypsta ir ekrano centre matyti jo sukurtas šviečiantis taškas. Prie horizontalių kreipimo plokščių prijungus kintantį laiko atžvilgiu elektrinį signalą (kintamąją įtampą), o prie vertikalių — *pjūklinės formos įtampą* (→ 4), ekrane galima stebėti, kaip tas elektrinis signalas kinta laikui bėgant. Pavyzdžiui, prijungus sinusinės formos kintamąją įtampą, galima išmatuoti elektroninio vamzdžio ekrane matomos sinusoidės periodą (→ 5).

Elektringosios dalelės judėjimas vienalyčiame magnetiniame lauke

Jau žinome, kad magnetinis laukas, kurio indukcija $\vec{B}$, veikia jame statmenai greičiu $\vec{v}$ judančią elektringąją dalelę (jos krūvis q) jėga $\vec{F} = q\vec{v}\vec{B}$, statmena tiek vektoriui $\vec{v}$, tiek vektoriui $\vec{B}$. Kai laukas vienalytis, indukcijos $\vec{B}$, taigi ir jėgos $\vec{F}$, vertė visuose jo taškuose yra vienoda. Jėga, kuri kiekvieną laiko akimirką yra statmena dalelės judėjimo trajektorijai, darbo neatlieka, nes nekinta tos dalelės kinetinė energija (kinetinės energijos teorema). Vadinasi, dalelė juda apskritimu tolygiai, o $\vec{F}$ yra įcentrinė jėga (→ 6).

Taigi turime: $qvB = \dfrac{mv^2}{R}$; iš čia $R = \dfrac{mv}{qB}$.

Elektringosios dalelės, judančios tam tikru greičiu statmenai magnetiniam laukui, trajektorijos spindulys yra tiesiog proporcingas greičiui v. Laiko tarpas (vadinamas *apsisukimo periodu*), per kurį dalelė nueina ilgio $2\pi R$ kelią (lygų apskritimo ilgiui), išreiškiamas formule

$$T = \frac{2\pi R}{v} = 2\pi \frac{m}{qB}.$$

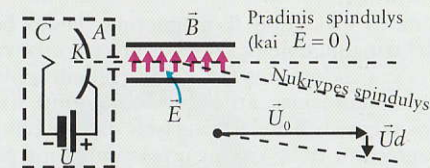
Iš jos matyti, kad apsisukimo periodas T nepriklauso nei nuo dalelės greičio, nei nuo jos trajektorijos spindulio.

Elektringųjų dalelių judėjimas elektriniame ir magnetiniame lauke

a)

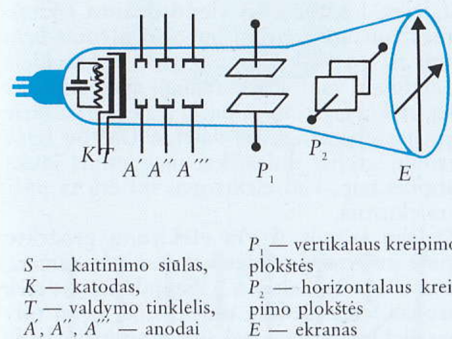
b)

1. Vienalytis elektrinis laukas veikia elektringąją dalelę tam tikra jėga. Teigiamąjį krūvį turinčiai dalelei ši jėga suteikia pagreitį, nukreiptą elektrinio lauko jėgų linijų kryptimi, neigiamąjį krūvį turinčiai dalelei — priešinga lauko jėgų linijoms kryptimi



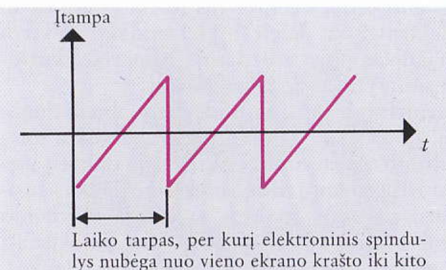
C — elektronų prožektorius, A — anodas, K — įkaitintas katodas, spinduliuojantis dėl termoelektroninės emisijos elektronus, U — šaltinis, sudarantis potencialų skirtumą U tarp katodo ir anodo, B — kreipimo plokštės

2. Elektrinis laukas veikia elektronus, įlėkusius į jį tam tikru pradiniu greičiu statmenai to lauko jėgų linijoms

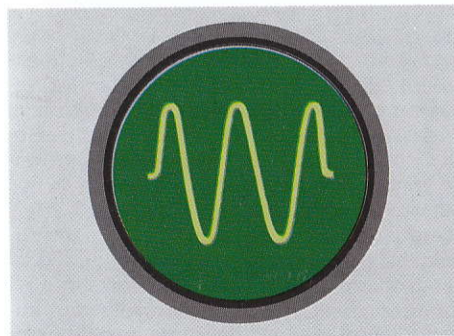


S — kaitinimo siūlas,
K — katodas,
T — valdymo tinklelis,
A′, A″, A‴ — anodai
P_1 — vertikalaus kreipimo plokštės
P_2 — horizontalaus kreipimo plokštės
E — ekranas

3. Elektroninio vamzdžio schema



4. Įtampos, prijungtos prie horizontalaus kreipimo plokščių (vertikaliųjų plokščių) ir valdančios spindulio judėjimą horizontalia kryptimi, kitimas



5. Sinusinis signalas oscilografo ekrane

6. Teigiamosios elektringosios dalelės, judančios magnetiniame lauke, greičio kryptis yra statmena magnetinio lauko indukcijos krypčiai. Dalelės trajektorija — apskritimas, nes jėga, kuri veikia ją kiekvieną akimirką, statmena greičio krypčiai

Dalelių greitintuvai

Ciklotronas

Įdomus elektrinio ir magnetinio lauko bei elektringųjų dalelių sąveikos taikymo pavyzdys yra *ciklotronas* (→ 1). Šis įrenginys plačiai naudojamas atliekant branduolio fizikos tyrimus, kai elektringąsias daleles reikia pagreitinti tiek, kad jų įgytos energijos pakaktų atomams suskaidyti.

Pagrindinės ciklotrono dalys: elektromagnetas, sukuriantis vienalytį magnetinį lauką; du D formos variniai elektrodai, vadinami duantais (kartu jie sudaro magnetiniam laukui statmeną cilindrinę ertmę); aukštojo dažnio kintamosios įtampos generatorius, prijungtas prie duantų (jis sukuria kintamąjį elektrinį lauką); jonų šaltinis S, esantis tarp duantų ertmės centre (jis tiekia greitintuvui elektringąsias daleles). Elektrodai ir elektromagnetas įtaisyti uždaroje kameroje, kurioje sudarytas didelis vakuumas.

Elektrinis laukas, atsiradęs tarp abiejų duantų, tam tikru pradiniu greičiu įtraukia jonų šaltinio S generuotą elektringąją dalelę į vieno iš tų duantų vidų. Elektrinis laukas susidaro tik tarp duantų; jų viduje elektrinio lauko nėra. Elektringąją dalelę, patekusią į duanto vidų, veikia tik magnetinis laukas. Jis verčia ją judėti pusiau apskritimine trajektorija. Per laiką $\frac{T}{2} = \frac{\pi m}{qB}$ dalelė priartėja prie elektrodo krašto. Būtent tą akimirką pasikeičia kintamojo elektrinio lauko kryptis ir dalelę, turinčią didesnį greitį negu pradinis, tam tikra jėga pradeda traukti antrasis duantas. Lėkdama iš pirmojo duanto į antrąjį, ji įgyja kinetinę energiją, lygią qU; čia U — duantų potencialų skirtumas.

Antrajame duante vyksta toks pat procesas, kaip ir pirmajame, tačiau čia dalelė juda didesnio kreivumo spindulio pusiau apskritimine trajektorija, nes didesnis yra jos greitis v. Judėdama tokia trajektorija, dalelė abiejuose duantuose užtrunka tiek pat laiko, mat sukimosi periodas nepriklauso nuo dalelės greičio. Dalelei pasiekus antrojo duanto kraštą, vėl pasikeičia elektrinio lauko kryptis, plyšyje tarp duantų dalelė įgyja papildomos kinetinės energijos qU ir toliau viskas kartojasi iš pradžių. Lakstančios iš vieno duanto į kitą dalelės trajektorijos kreivumo spindulys didėja tol, kol dalelė atsiduria prie išorinės duanto sienelės. Tada, panaudojant kreipimo ritę, dalelė pro atitinkamą plyšį išleidžiama iš greitintuvo ir nukreipiama į tiriamąjį objektą. Taigi elektringoji dalelė išlekia pro plyšį A, turėdama kinetinės energijos nqU; čia n — skaičius, rodantis, kiek kartų dalelė perlėkė iš vieno duanto į kitą.

Betatronas ir sinchrotronas

Ciklotronas netinka elektronams greitinti, nes jų masė yra tokia maža, kad jų greitis, esant palyginti mažai kinetinei energijai, priartėja prie šviesos greičio.

Iš reliatyvumo teorijos žinome, kad tokiomis aplinkybėmis (kai dalelės masė ir apsisukimo periodas neišlieka pastovūs) dalelės skriejimas nustoja būti sinchroniškas su elektrinio lauko kitimu (o juk būtent šis sinchroniškumas padeda greitinti elektringąsias daleles, lekiančias iš vieno duanto į kitą).

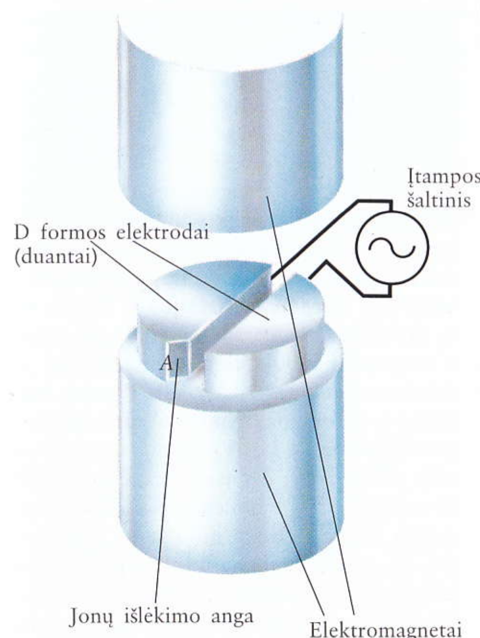
Elektronams greitinti buvo sugalvotas *betatronas*. Jo veikimas pagrįstas tokia idėja: naudojant valdomą kintamąjį magnetinį lauką, reikia greitinti ta pačia trajektorija skriejančias elektringąsias daleles. Dalelių (elektronų) greitis didės, kai magnetinis laukas stiprės taip, kad elektronai skrietų ta pačia trajektorija.

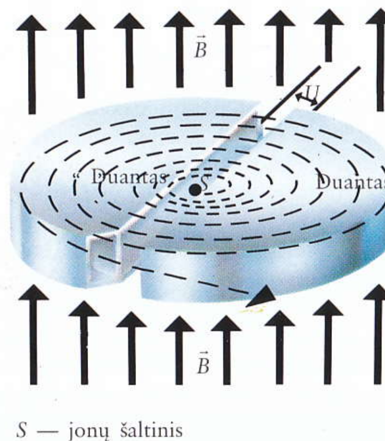
Dalelių šaltinis S yra elektronų prožektorius, įtaisytas žiedinės vakuuminės kameros krašte (→ 2). Šaltinio S išspinduliuotas elektronas lekia žiedine trajektorija, o tai tolygu elektros srovei, tekančiai apskritu laidu, kuris yra kintamajame magnetiniame lauke. Ciklo pabaigoje elektronai susiduria su taikiniu T, sužadindami galingą Rentgeno spindulių pluoštą. Po to magnetinis laukas vėl pradeda kisti iš pradžių ir ciklas kartojasi.

Betatronui, kaip ir ciklotronui, reikalingas didelis magnetas, kuris apgaubtų visą vakuuminę kamerą. Jo magnetinio lauko jėgų linijos turi būti išlenktos taip, kad verstų elektronus visada lėkti ta pačia apskritimine trajektorija (→ 3).

Betatrone elektronai įgyja iki 300 MeV energiją. Didesnės energijos elektronams suteikti negalima dėl magneto savybių. Todėl betatronas nenaudojamas kaip mokslinio tyrimo įrenginys. Jį pakeitė *sinchrotronas*, kuriame vietoj vieno didelio magneto įtaisyta daug mažų magnetų, išdėliotų žiedu apie vakuuminę kamerą (→ 4).

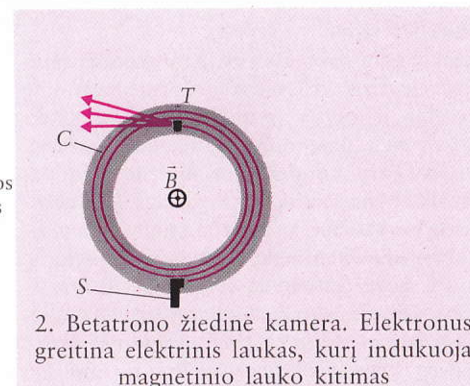
Dalelių greitintuvai



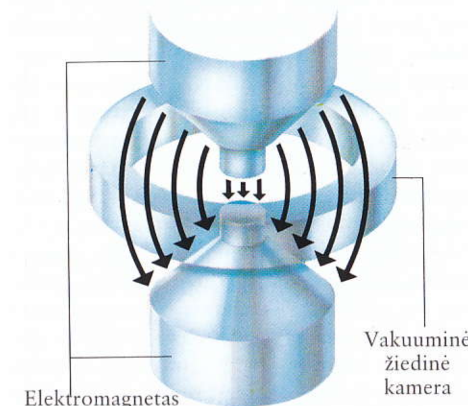


S — jonų šaltinis

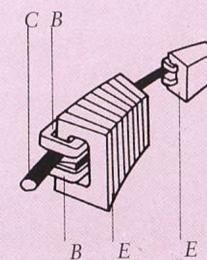
1. Ciklotronas. Viršuje — jo schema, apačioje — duantai ir jonų trajektorija



2. Betatrono žiedinė kamera. Elektronus greitina elektrinis laukas, kurį indukuoja magnetinio lauko kitimas



3. Betatrone išorinės magnetinio lauko jėgų linijos yra išgaubtos taip, kad dalelės žiedinėje vakuuminėje kameroje skrietų numatyta apskritimine trajektorija



4. Apie žiedinę sinchrotrono kamerą C išdėliota daug mažų elektromagnetų E su ritėmis B

Elektromagnetinės bangos

Slinkties srovė

Įelektrinant arba išelektrinant kondensatorių, elektros krūvininkai išorine grandine pereina iš vienos jo plokštės į kitą. Toks krūvininkų judėjimas vadinamas *laidumo srove*. Tarp kondensatoriaus plokščių paprastai būna izoliacinė medžiaga (*dielektrikas*), pavyzdžiui, oras arba stiklas. Kaip žinoma, dielektrikuose krūvininkai nejuda, todėl srovė čia neteka (→ 1). Be to, pastebėta, kad dielektrike susidaro toks magnetinis laukas, tarsi išorinės grandinės srovė tekėtų dielektriku. Ši srovė (bet ne laidumo srovė) vadinama *slinkties srove*. Ji egzistuoja bet kokiame dielektrike, kurį veikia kintamasis elektrinis laukas (→ 2). Taigi galima daryti tokią išvadą: *kintamasis elektrinis laukas kiekviename savo taške sukuria magnetinį lauką*. Tai galioja visuomet, o ne tik tada, kai kondensatorius išsielektrina ar įsielektrina. Šį reiškinį, kaip ir elektromagnetinę indukciją (kiekvienas kintamasis magnetinis laukas sukuria elektrinį lauką) išsamiai apibūdina *Maksvelo lygtys*.

Maksvelo elektromagnetinio lauko teorija teigia, kad kiekviename erdvės taške, kuriame yra periodiškai kintantis elektrinis laukas (arba magnetinis laukas), egzistuoja ir periodiškai kintantis magnetinis laukas (arba elektrinis laukas). Tame taške elektrinio lauko stiprio ir magnetinės indukcijos vektoriai yra statmeni vienas kitam, be to, jie kartu didėja, mažėja arba pasidaro lygūs nuliui.

Elektromagnetinės bangos

Tarkime, kad erdvėje yra periodiškai kintantis magnetinis laukas. Išskirkime šioje erdvėje nedidelį tūrio dV kubą, kurio dvi plokštumos lygiagrečios su vektorių $\vec{E}$ ir $\vec{B}$ plokštumomis (→ 3). Tūrio dV dalies energija lygi

$$\left(\frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0}\right)\mathrm{d}V.$$

Ji didėja kartu su elektrinio lauko stipriu bei magnetine indukcija, o kai šie tampa lygūs nuliui, ir energija virsta nuliu (→ 4). Elektromagnetinio lauko teorija teigia, kad elektromagnetinio lauko energija visada pernešama statmenai laukų vektoriams ta kryptimi, kuria slenka dešininis sraigtas, vektorių $\vec{E}$ sukant vektoriaus $\vec{B}$ link. Elektrinio lauko stipriui $\vec{E}$ ir magnetinei indukcijai $\vec{B}$ didėjant viena ar kita kryptimi, elektromagnetinio lauko energijos sklidimo kryptis nekinta (→ 3). Taigi elektromagnetinio lauko energija sklinda bangomis. Viename tam tikrame paviršiuje (→ 5) tam tikrą akimirką ($t = 0$) elektrinio lauko stipris ir magnetinė indukcija visuose taškuose yra didžiausia (*bangos paviršius*). Praėjus laiko tarpui t, kitame paviršiuje vėl turėsime bangos maksimumą, kuris nuo pirmojo bus nutolęs atstumu ct; čia t — laiko tarpas tarp vienas po kito einančių elektrinio lauko stiprio ir magnetinės indukcijos maksimumų, c — elektromagnetinių bangų sklidimo greitis, kuris vakuume yra apie $3 \cdot 10^8$ m/s, nepriklausomai nuo bangos dažnio ar amplitudės. Maksvelo teorija įrodo, kad terpėje, kurios dielektrinė skvarba ε ir magnetinė skvarba μ, elektromagnetinės bangos sklinda greičiu

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}.$$

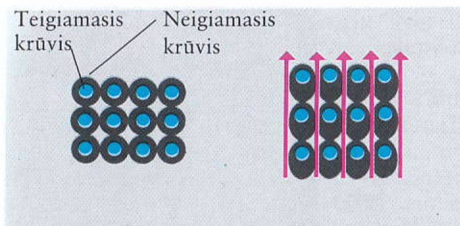
Šioje lygtyje ε ir μ vertes pakeitę jų vertėmis vakuume (ε_0, μ_0), gauname minėtą elektromagnetinių bangų sklidimo greičio vakuume vertę, t. y. apie $3 \cdot 10^8$ m/s.

Žinome, kad ε_0 visada yra konstanta, tačiau kurios nors medžiagos dielektrinės skvarbos ε didumas priklauso nuo elektromagnetinės bangos dažnio, todėl elektromagnetinių bangų sklidimo greitis įvairiose medžiagose priklauso nuo jų dažnio. Elektromagnetinių bangų dažniai ir juos atitinkantys bangų sričių pavadinimai nurodyti paveiksle (→ 6). Sklindančių vakuume bangų ilgis λ susijęs su dažniu ν tokiu sąryšiu:

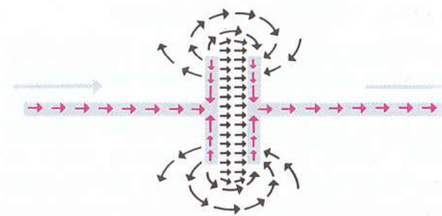
$$\lambda = \frac{c}{\nu};$$

čia c — šviesos greitis.

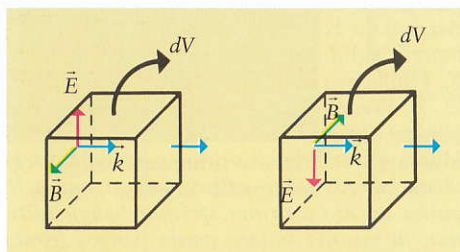
Elektromagnetinės bangos



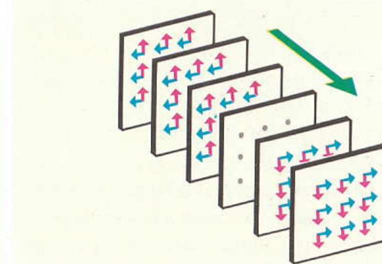
1. Veikiamos elektrinio lauko, dielektriko molekulės poliarizuojasi, t. y. krūvininkai pasislenka



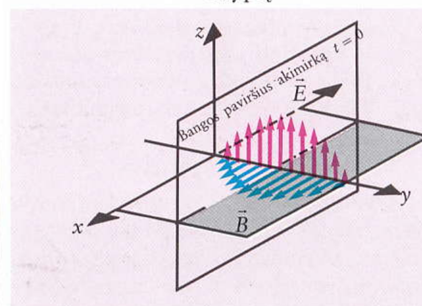
2. Įelektrinant ir išelektrinant kondensatorių atsirandanti laidumo srovė ir slinkties srovė (laidumo srovė pažymėta raudona spalva, slinkties srovė — juoda)

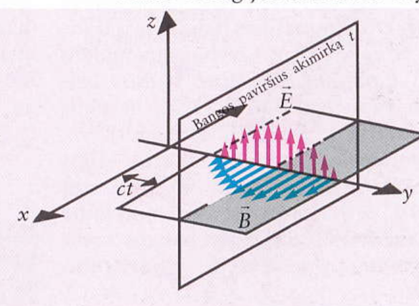


3. Energija pernešama vektoriaus $\vec{k}$ kryptimi, nors vektoriai $\vec{E}$ ir $\vec{B}$ keičia kryptį

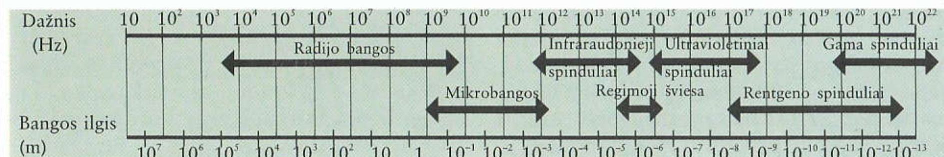


4. Elektrinio lauko stiprio $\vec{E}$ ir magnetinės indukcijos $\vec{B}$ kitimas elektromagnetinio lauko energijos sklidimo kryptimi





5. Elektromagnetinės bangos, sklindančios greičiu c ašies y kryptimi, paviršius



6. Elektromagnetinių bangų skalė

Optika

Šviesos sklidimas

Optika yra fizikos šaka, tirianti šviesą ir įvairius su ja susijusius reiškinius. Šviesos savybėmis imta domėtis dar antikos laikais. Jau tada buvo bandyta matuoti šviesos sklidimo greitį. Vieną jo matavimo būdų 1675 m. sugalvojo danų astronomas O. Remeris (O. Römer). Šio būdo (→ 1) esmė yra ta, kad stebima, kaip priklauso vieno Jupiterio palydovo užtemimų vėlavimo trukmė (kai Jupiteris ir Žemė yra *1* ir *2* padėtyje) nuo Žemės padėties jos orbitoje. *2* padėtyje palydovas pasirodo prie Jupiterio krašto 16 minučių ir 26 sekundėmis vėliau negu *1* padėtyje. Žemės orbitos skersmens ir šios vėlavimo trukmės santykis lygus šviesos greičiui. O. Remeris apskaičiavo, kad šviesos greitis lygus maždaug $3 \cdot 10^8$ m/s. Šis rezultatas 1849 m. buvo patvirtintas prancūzų fiziko A. Fizo (A. Fizeau) bei 1926 m. amerikiečių fiziko A. Maikelsono (A. Michelson) bandymais (→ 2, 3). Jų nustatyta šviesos greičio vertė sutapo su elektromagnetinių bangų sklidimo greičio verte, apskaičiuota remiantis Dž. K. Maksvelo teorija. Pasak Dž. K. Maksvelo, *šviesa yra elektromagnetinės bangos*. Šią hipotezę kiek vėliau patvirtino H. Hercas (H. Hertz), bandymais gavęs metrines elektromagnetines bangas ir išaiškinęs jų bei šviesos bangų savybių (atspindžio ir lūžimo) tapatumą. Banginę šviesos prigimtį įrodė prancūzų fizikai O. Ž. Frenelis (O. J. Fresnel) ir L. Fuko (L. Foucault).
Elektromagnetines bangas, kurių ilgis vakuume yra nuo 0,4 μm iki 0,7 μm (1 μm = 10^{-6} m), žmogaus akies tinklainė suvokia kaip šviesą, todėl tos bangos vadinamos *regimąja spinduliuote*, arba, trumpiau, *šviesa*.

Šviesos spindulys

Trajektorija, kuria šviesos banga perneša energiją, vadinama *šviesos spinduliu*. Kaip žinome, šviesos spindulys yra statmenas šviesos bangos paviršiui (kaip ir elektromagnetinių bangų, sklindančių erdvėje), išskyrus bangų, sklindančių anizotropine terpe (kurios savybės priklauso nuo bangos sklidimo krypties). Tokia terpė, pavyzdžiui, gali būti kristalai (išskyrus monometrinius kristalus).

Lūžio rodiklis

Tam tikro dažnio šviesos banga sklinda įvairiomis terpėmis greičiu, kurį nulemia tos terpės savybės. Optikoje dažniau vartojama terpės *lūžio rodiklio* nei šviesos sklidimo greičio sąvoka. Lūžio rodiklis n išreiškiamas šviesos greičio c vakuume ir šviesos greičio v terpėje santykiu: $n = \frac{c}{v}$ (→ 4). Kadangi v priklauso nuo spinduliuotės dažnio, tai, jam kintant, kinta ir lūžio rodiklis (→ 5).

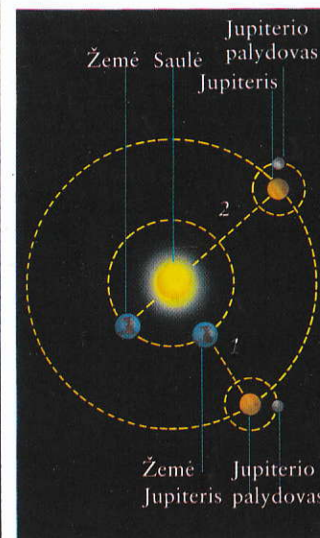
Hiuigenso ir Frenelio principas

Bet kokius bangas sukeliančius reiškinius ir bangų sklidimo ypatybes gali paaiškinti K. Hiuigenso (Ch. Huygens) principas, kurį O. Ž. Frenelis pritaikė banginei šviesos prigimčiai tirti.
Hiuigenso ir Frenelio principas teigia: *kiekvieną bangos tašką galima laikyti nauju to paties dažnio antrinių sferinių bangų šaltiniu; jų visuma sudaro naują bangos frontą* (→ 6). Remiantis Hiuigenso principu, galima teigti, kad erdvėje, kurioje sklinda elektromagnetinė banga, kuriami du bangų frontai: vienas jų sklinda ta pačia kryptimi, kaip ir banga (*progresyvioji banga*), kitas — priešinga kryptimi (*regresyvioji banga*). O. Ž. Frenelis įrodė, kad antrojo fronto nėra, nes dėl interferencijos jis pasinaikina.

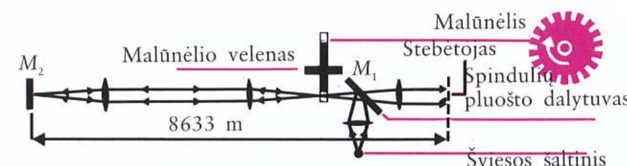
Šviesos atspindys

Kai šviesa krinta į dviejų skirtingų terpių sandūrą, tai tos sandūros taškai virsta antrinių bangų šaltiniais (jų sąveika sudaro naują bangos frontą). Antrinė banga sklinda pirminės bangos terpe tokiu pat greičiu, kaip ir pirminė banga.
Tam tikrą akimirką krintanti banga pasiekia atspindinčio paviršiaus tašką A (p. 65→ 1), praėjus laiko tarpui t — tašką A_1, praėjus laiko tarpui $2t$ — tašką A_2, praėjus $3t$ — A_3, praėjus $4t$ — A_4. Pradinę akimirką taškas A išspinduliuoja antrinę bangą, kuri per laiką $4t$ pasiekia tašką B. Taigi $AB = v \cdot 4t$; čia v — bangos sklidimo greitis.

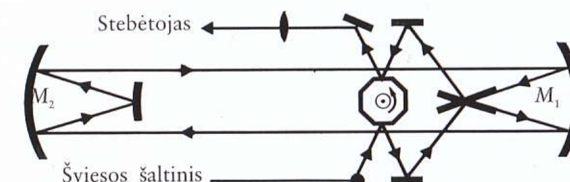
Šviesos sklidimas



1. Remerio metodo šviesos greičiui matuoti schema



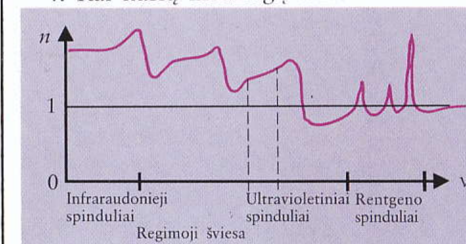
2. Fizo metodas leidžia nustatyti šviesos greitį be astronominių stebėjimų. Tereikia išmatuoti laiką, per kurį šviesa nusklinda 17 266 m (2 × 8633 m) atstumą. Malūnėlis suformuoja trumpus šviesos impulsus



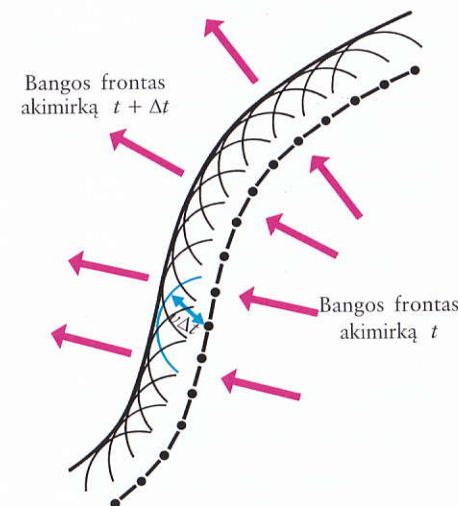
3. Maikelsono metodas panašus į Fizo metodą. Šviesa pasiekia stebėtoją tik tada, kai aštuoniakampis veidrodis sukasi tam tikru greičiu

Terpė	Jos lūžio rodiklis n
Vakuumas	1
Vandenilis	1,000132
Oras	1,000293
Anglies dioksidas	1,00045
Vanduo	1,333
Etilo alkoholis	1,361
Silicis	1,458
Gintaras	1,55
Deimantas	2,419

4. Kai kurių medžiagų lūžio rodikliai



5. Lūžio rodiklio priklausomybė nuo bangos dažnio ν



6. Bangų, sklindančių iš kiekvieno antrinės bangos šaltinio, visuma sudaro naują bangos frontą

Tuo pat metu antrinės bangos, išspinduliuotos iš taško A_1, spindulys bus $A_1B_1 = v \cdot 3t$, iš taško A_2 — $A_2B_2 = v \cdot 2t$, o iš taško A_3 — $A_3B_3 = vt$. Taigi antrinių bangų spindulys yra tiesiog proporcingas jų centro atstumui nuo A_4 ir $BA_4 = AB'$. Vadinasi, antrinių bangų visuma sudaro statmeną spinduliams plokštumą, einančią per tašką A_4. Kadangi statieji trikampiai ABA_4 ir $AB'A_4$ turi bendrą įžambinę, tai jie yra lygūs. Kampas α, kurį krintančios bangos frontas sudaro su atspindinčiuoju paviršiumi, lygus kampui β tarp atsispindėjusios bangos fronto ir to paviršiaus. Kampai, kuriuos krintantysis ir atsispindėjęs spindulys sudaro su statmeniu tam paviršiui, taip pat yra lygūs (tie kampai yra toje pačioje plokštumoje, kaip ir statmuo). Taigi galime suformuluoti tokius šviesos atspindžio dėsnius: 1) *krintantysis spindulys, atsispindėjęs spindulys ir iš kritimo taško iškeltas statmuo terpes skiriančiam paviršiui yra toje pačioje plokštumoje;* 2) *kritimo kampas lygus atspindžio kampui.*

Šviesos lūžimas

Šviesos sklidimo greitis priklauso nuo terpės, kuria sklinda šviesa (→ 2).
Raide v_1 pažymėkime bangos sklidimo pirmąja terpe greitį, o v_2 — jos sklidimo antrąja terpe greitį. Per laiką $4t$ krintančioji banga nueina kelią

$$BA_4 = v_1 \cdot 4t,$$

tuo tarpu antrinė banga nuo taško A — kelią

$$AC = v_2 \cdot 4t.$$

Jei γ yra lūžio kampas, t. y. kampas, kurį antrinės bangos frontas sudaro su terpes skiriančiu paviršiumi, tai

$$BA_4 = AA_4 \sin\alpha \text{ ir } AC = AA_4 \sin\gamma.$$

Padalinę vieną lygybę iš kitos, gauname:

$$\frac{BA_4}{AC} = \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}.$$

Kadangi

$$\frac{BA_4}{AC} = \frac{v_1 \cdot 4t}{v_2 \cdot 4t} = \frac{v_1}{v_2},$$

tai

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Šią lygybę dar galime užrašyti taip:

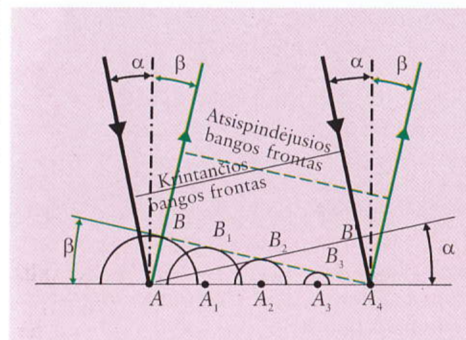
$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21};$$

čia n_1 yra pirmosios terpės lūžio rodiklis, n_2 — antrosios terpės lūžio rodiklis, n_{21} — *santykinis lūžio rodiklis* (arba antrosios terpės lūžio rodiklis pirmosios terpės atžvilgiu).
Iš paskutiniosios lygybės matyti: jei $n_2 > n_1$, tai $\gamma < \alpha$, kitaip tariant, lūžęs spindulys priartėja prie statmens terpes skiriančiam paviršiui (→ 3).
Ir atvirkščiai, jei $n_1 > n_2$, tai lūžęs spindulys nutolsta nuo statmens terpes skiriančiam paviršiui (→ 5). Šiuo atveju yra tam tikras ribinis kritimo kampas, atitinkantis lūžio kampą $\gamma = 90°$. Kritęs didesniu už ribinį kampu, spindulys nelūš, jis tik atsispindės (*visiškasis atspindys*).

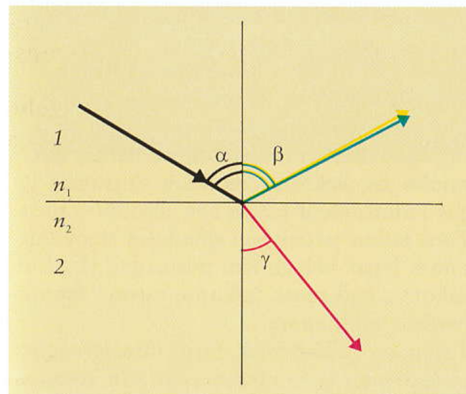
Šviesos dispersija

Žinome, kad terpės lūžio rodiklis priklauso nuo ja sklindančios bangos dažnio. Turėdami galvoje regimąją šviesą, galime tvirtinti, kad, didėjant jos dažniui, terpės lūžio rodiklis paprastai didėja (p. 63 → 5).
Tai reiškia, kad didesnio dažnio šviesa lūžta labiau, o mažesnio dažnio — mažiau.
Šį reiškinį galima stebėti leidžiant pro prizmę (→ 4) baltos spalvos šviesos spindulį (jį sudaro visų matomų spalvų spinduliai). Kiekvienas skirtingos spalvos (skirtingo virpesių dažnio) spindulys, praėjęs pro prizmę, nukrypsta nevienodai. Galima pastebėti, kad spinduliai, kurių virpesių dažnis mažesnis (raudoni spinduliai), nukrypsta mažiau nei tie, kurių virpesių dažnis didesnis (violetiniai spinduliai). Šis reiškinys vadinamas šviesos *dispersija*.

Šviesos atspindys, lūžimas ir dispersija



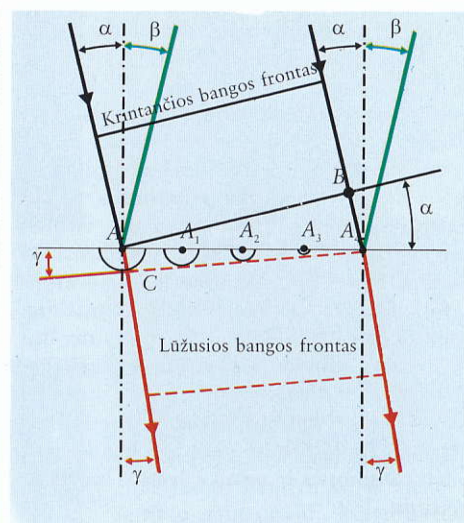
1. Atspindžio aiškinimas remiantis Hiuigenso principu



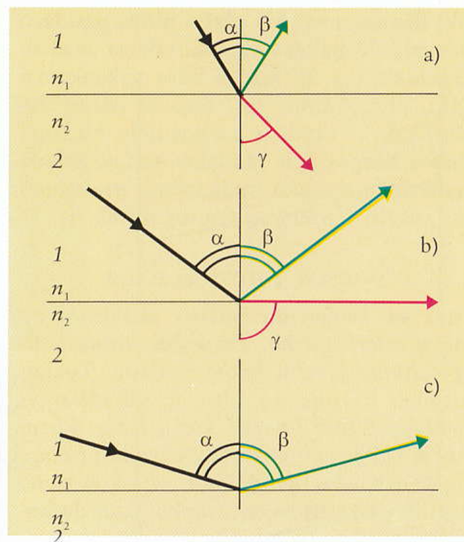
3. *1* terpės lūžio rodiklis mažesnis negu *2* terpės ($n_1 < n_2$). Kampas γ mažesnis už kampą α. Šiuo atveju šviesa visada lūš



4. Šviesos, sklindančios pro trikampę stiklinę prizmę, dispersija



2. Šviesos lūžimas (krintanti banga pavaizduota juoda spalva, lūžusi — raudona spalva, o atsispindėjusi — žalia spalva)



5. *1* terpės lūžio rodiklis didesnis negu *2* terpės ($n_1 > n_2$). Taigi $\gamma > \alpha$. Egzistuoja tam tikras ribinis kritimo kampas, atitinkantis $\gamma = 90°$. Kai α didesnis už tą ribinį kampą, spindulys nelūžta

Šviesos difrakcija

Sakykime, plokščioji banga sklisdama pasiekia kliūtį, kurioje yra mažas plyšys (→ 1). Pagal Hiuigenso principą, plyšio ir kliūties taškai virsta antrinių bangų šaltiniais. Šios antrinės bangos, išskyrus generuotas plyšyje, toliau sklisti negali, todėl atsispindi ir grįžta atgal, tuo tarpu generuotos plyšio kraštuose pereina kliūtį ir už jos sklinda kaip sferinės bangos. Taigi, susidūrusi su kliūtimi, banga pakeičia savo sklidimo kryptį. Šis reiškinys vadinamas *bangų difrakcija*. Garso bangų, sklindančių pro praviras duris ar langą, difrakcijos reiškinys (kuris gana dažnas kasdieniame gyvenime) buvo žinomas net I. Niutono laikais. Tada šviesos difrakciją buvo sunku patikrinti bandymais, todėl I. Niutonas ir nelaikė šviesos bangininu reiškiniu.

Nagrinėjamą reiškinį lengva patikrinti turint indą su vandeniu. Tereikia jo paviršiuje strypeliu sukelti nedideles bangas ir pamažėle didinti plyšio plotį. Galima pastebėti tokį dėsningumą: kai plyšio plotis pasidaro didesnis už bangos ilgį, difrakcija mažiau pastebima (→ 2). Kad ji būtų pakankamai ryški, plyšio plotis turi būti to paties dydžio, kaip ir vandens bangos ilgis. Kadangi šviesos bangos ilgis yra labai mažas, galima suvokti, kaip sunku tradicinėmis priemonėmis sukelti pastebimą šviesos difrakciją.

Šviesos interferencija

Kitas su bangavimu susijęs reiškinys yra *bangų interferencija*. Tai *koherentinių bangų šaltinių* sukeltų bangų sudėtis. Tokiais šaltiniais laikomi du šaltiniai, skleidžiantys vienodo dažnio bangas, kurių fazių skirtumas laikui bėgant nekinta. Neturint priemonių, leidžiančių spinduliuoti šviesą iš vieno šaltinio (išskyrus lazerį), sunku gauti du koherentinių bangų šaltinius.

Klasikinis tokių šaltinių variantas yra Jungo langai (→ 3) ir Frenelio biprizmė (→ 4).

Šviesos interferencijos rezultatas yra didesnis ar mažesnis šviesos stipris taške, kuriame viena banga užkloja kitą.

Jei bangų fazės sutampa, tai abu elektrinio lauko stiprio vektoriai yra vienodos krypties. Juos sudėjus, gaunamas tos pačios krypties vektorius, kurio modulis lygus abiejų vektorių modulių sumai (→ 5a). Atstojamosios bangos amplitudė lygi interferuojančių bangų amplitudžių sumai, ir šviesos energija tuose taškuose, kuriuose susideda vektorių moduliai, yra labai didelė. Šiuos taškus pasiekusių spindulių eigos skirtumas lygus nuliui arba yra bangos ilgio kartotinis. Sakoma, kad čia turime *interferencijos maksimumą*.

Erdvės taškuose, kuriuose bangos yra priešingų fazių, elektrinio lauko stiprio vektoriai nukreipti į priešingas puses, todėl jų atstojamojo vektoriaus modulis lygus abiejų vektorių modulių skirtumui.

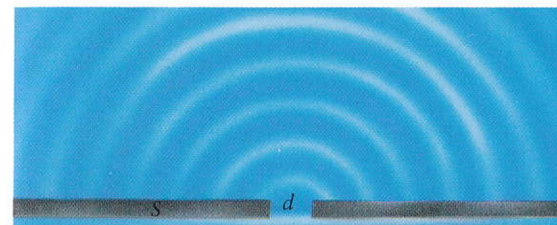
Naudojant minėtas koherentinių bangų šaltinių gavimo priemones, galima pastebėti, kad tuose taškuose, kuriuose abiejų vektorių moduliai yra vienodi, o bangų fazės priešingos, vektorių modulių skirtumas lygus nuliui (→ 5b). Čia bus absoliuti tamsa. Tuos taškus pasiekusių spindulių eigos skirtumas lygus nelyginiam pusbangių skaičiui. Sakoma, kad tuose taškuose turime *interferencijos minimumą*.

Taškuose, esančiuose tarp interferencijos maksimumų ir minimumų, šviesos intensyvumas yra tarpinis. Pastatę ekraną ten, kur koherentinės bangos užkloja viena kitą, gausime šviesių ir tamsių ruožų seką. Kai koherentinių bangų šaltinis yra plyšio formos (→ 3), gaunamos *interferencijos juostos*. Ekrano centre visada susidaro šviesi juosta, atitinkanti nulinį spindulių eigos skirtumą, nes centras vienodai nutolęs nuo abiejų koherentinių bangų šaltinių.

Grįžkime prie 5 paveikslo. Atstumą tarp koherentinių bangų šaltinių pažymėkime raide a, o jų nuotolį nuo ekrano — raide D. Nesudėtingai apskaičiavę nustatytume, kad šviesios juostos ekrane nutolusios nuo centrinės juostos O atitinkamai atstumu

$$\frac{D\lambda}{a}, \frac{2D\lambda}{a}, \frac{3D\lambda}{a}, \ldots$$

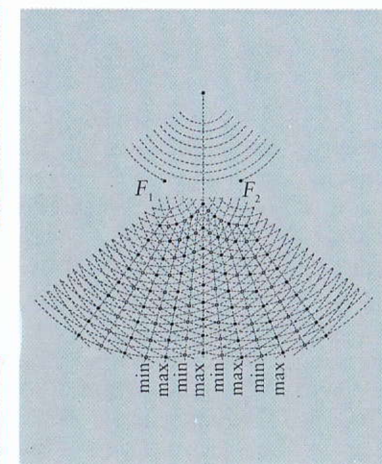
Šviesos interferencija



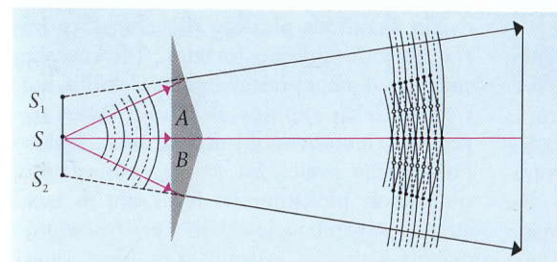
1. Plokščioji banga pasiekia kliūtį, kurioje yra mažas plyšys. Už jo banga jau sklinda kaip sferinė



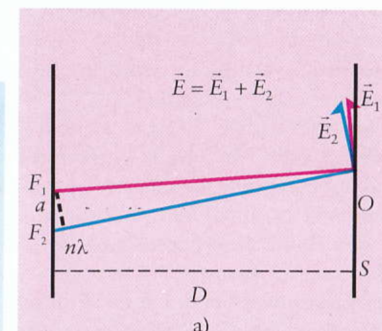
2. Didinant plyšio plotį, difrakcija stebima tik prie plyšio kraštų

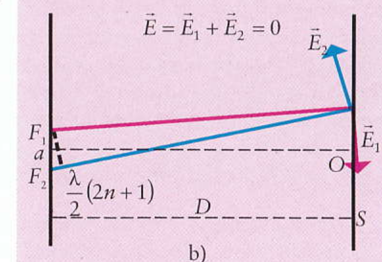


3. Jungo bandymas: iš vieno šaltinio gaunami du koherentinių bangų šaltiniai F_1 ir F_2



4. Frenelio biprizmė. Šviesos šaltinio S atvaizdai S_1 ir S_2, gauti prizmėmis A ir B, yra koherentinių bangų šaltiniai. Tose vietose, kur bangos užkloja viena kitą, matomas interferencinis vaizdas





5. Dviejų koherentinių spindulių interferencija:

a) abiejų spindulių elektrinio lauko stiprio vektoriai yra vienodos krypties (interferencijos maksimumas);
b) abiejų spindulių elektrinio lauko stiprio vektoriai yra priešingų krypčių (interferencijos minimumas)

Tamsios juostos nutolusios nuo centrinės atstumu

$$\frac{D\lambda}{2a}, \frac{3D\lambda}{2a}, \frac{5D\lambda}{2a}, \ldots$$

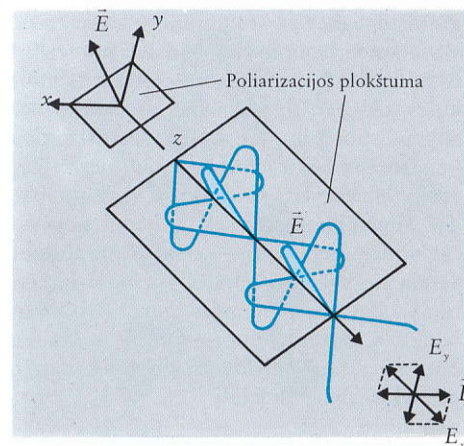
čia λ — šviesos bangos ilgis.
Nesunku suvokti, kad, matuojant vienos juostos atstumą nuo centrinės juostos, galima apskaičiuoti šviesos bangos ilgį.

Šviesos poliarizacija

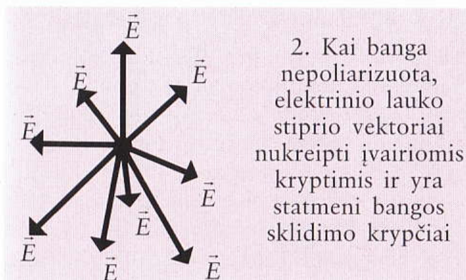
Iki šiol nagrinėti optiniai reiškiniai, žinomi dar prieš Dž. K. Maksvelo elektromagnetinių bangų teoriją, aiškiai rodė, kad šviesai būdingos bangų savybės, tačiau niekas negalėjo pasakyti, kokių bangų — skersinių ar išilginių. Dar vienas reiškinys — šviesos *poliarizacija* — padėjo fizikams anksčiau negu Dž. K. Maksvelui įrodyti, kad šviesa yra skersinės bangos.
Kai svyravimas vyksta fiksuota kryptimi (pavyzdžiui, statmena jo sklidimo krypčiai), sakoma, kad banga yra *poliarizuota vienoje plokštumoje* (→ 1). Plokštuma, sutampanti su bangos elektrinio lauko stiprio vektoriaus $\vec{E}$ svyravimo plokštuma, vadinama *poliarizacijos plokštuma.*
Poliarizuotosios šviesos elektrinio lauko stiprio vektorius visada lygiagretus su svyravimo kryptimi, o poliarizacijos plokštuma sutampa su svyravimo plokštuma, be to, joje yra sklindantis šviesos spindulys. Natūralioji šviesa paprastai yra nepoliarizuota, bet jei galėtume stebėti šviesos spindulį, matytume, kad jame elektrinio lauko stiprio vektorius svyruoja visomis kryptimis, statmenomis spindulio sklidimo krypčiai (→ 2).
Šviesos šaltiniai dažniausiai skleidžia bangas ne ištisai, o labai trumpais impulsais. Kiekvienas toks sklindantis virpesys yra poliarizuotas skirtingomis kryptimis (→ 3). Spindulio sklidimo krypties atžvilgiu šie virpesiai beveik simetriški.
Specialiomis priemonėmis galima nuslopinti virpesius tam tikromis kryptimis arba tomis kryptimis sumažinti jų amplitudę. Tokia šviesa ir vadinama poliarizuotąja (→ 4).
Keičiant nepoliarizuoto šviesos spindulio kritimo kampą, galima pasiekti, kad lūžęs spindulys būtų statmenas atsispindėjusiam spinduliui. Šiuo atveju atsispindėjęs spindulys bus visiškai poliarizuotas. Jo elektrinio lauko stiprio vektorius bus statmenas plokštumai, kurioje yra krintantis spindulys ir statmuo, iškeltas iš tos plokštumos, į kurią krinta spindulys. Krintančio spindulio ir statmens plokštumai sudarytas kampas vadinamas Briusterio kampu (→ 5).
Gamtoje randama mineralų (kalcitas, kvarcas, turmalinas ir kt.), praleidžiančių tik vienoje plokštumoje poliarizuotą šviesą. Iš visų šviesos spindulio elektrinio lauko stiprio vektorių pro tuos mineralus praeina tik tas vektorius, kuris yra poliarizacijos plokštumoje.
Poliarizuotą šviesą paprasčiausia gauti naudojant *poliaroidą* — plokštelę, sudarytą iš dviejų skaidraus plastiko plėvelių, tarp kurių yra jodo chinino fosfatas. Tai kristalai, sudaryti iš nepaprastai ilgų molekulių, kurios dėl labai stipraus elektrinio lauko poveikio orientuotos viena kryptimi. Dėl to poliaroidas praleidžia šviesą, poliarizuotą tik vienoje plokštumoje. Iš tikrųjų jis labai stipriai sugeria tą jos dalį, kuri orientuota nelygiagrečiai su kristalų grandine.
Poliaroidai naudojami įvairiuose laboratoriniuose įrenginiuose. Jie taip pat padeda apsisaugoti keliuose nuo saulės spindulių atspindžio. Pavyzdžiui, dėl tinkamai poliarizuoto automobilio priekinio stiklo arba vairuotojo akinių išvengiama akinimo (→ 6).

OPTIKA

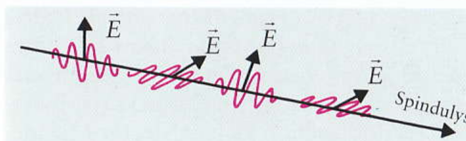
Šviesos poliarizacija



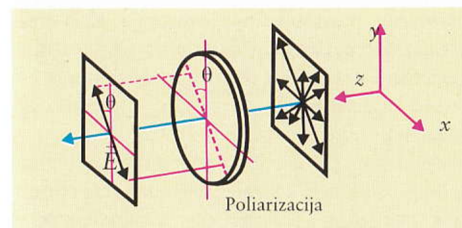
1. Stiprio $\vec{E}$ elektrinis laukas svyruoja fiksuota kryptimi. Banga poliarizuota lygiagrečioje su šia kryptimi plokštumoje



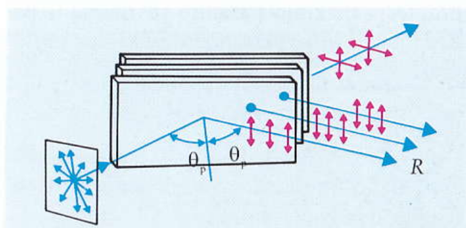
2. Kai banga nepoliarizuota, elektrinio lauko stiprio vektoriai nukreipti įvairiomis kryptimis ir yra statmeni bangos sklidimo krypčiai



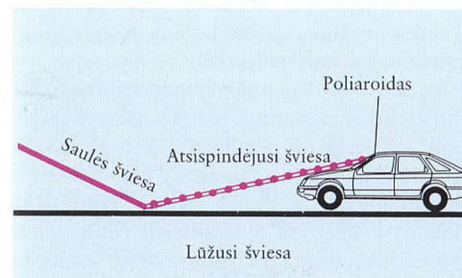
3. Šviesos spindulys sudarytas iš sekos trumpų bangų, kurių kiekvienos virpesiai orientuoti skirtingose plokštumose

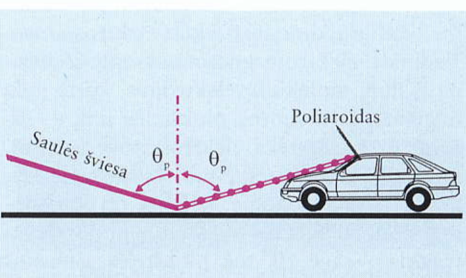


4. Poliarizatorius praleidžia tik tam tikros krypties elektrinio lauko stiprio vektorių



5. Kai balta šviesa krinta į stiklą kampu θ_p, vadinamu Briusterio kampu, atsispindėjusi šviesa yra poliarizuota





6. Saulės šviesa kritimo plokštumoje yra visiškai poliarizuota. Jei automobilio priekinis stiklas yra tinkamai poliarizuotas, tai šviesos atspindys ta kryptimi panaikinamas

Atomo fizika

Jonizacija ir fotoelektra

Objektai, matomi pro optinius prietaisus, priskiriami *makroskopiniam* pasauliui. Tuo tarpu *mikroskopinis* pasaulis susideda iš dalelių, apie kurių buvimą sužinoma tyrinėjant jų kinetinę energiją ar judesio kiekį.
Judančio elektrono negalime pamatyti kaip skriejančio teniso kamuoliuko (→ 1). Apie visų labai mažų tiesiogiai nematomų dalelių egzistavimą sprendžiame tik iš tam tikrų padarinių (→ 2). Taigi dažnai tik jie leidžia suprasti, ar ta maža dalelė elgiasi kaip tikra dalelė ar kaip banga. Pavyzdžiui, elektronas yra „kažkas“, turintis elektros krūvį; jį esame įpratę vaizduoti kaip dalelę, turinčią mechaninių kūnų savybių, arba kaip bangą, kuri savo ruožtu yra grynai mechaninis reiškinys.
Galimi mikroskopinio pasaulio vaizdiniai praplečia fizikinio pasaulio suvokimą ir padeda paaiškinti vykstančius fizikinius reiškinius.

Dujų jonizacija

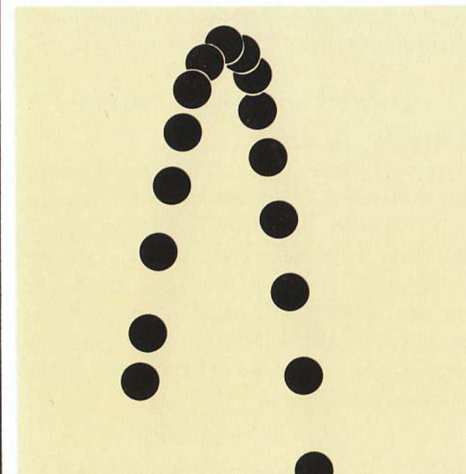
Dujos sudarytos iš daugybės laisvai judančių dalelių (*molekulių*). Kiekvienos jų elektros krūvis lygus nuliui.
Dvi plokšteles (tarp kurių yra dujų) prijunkime prie įtampos šaltinio. Elektros srovė iš vienos plokštelės į kitą netekės (→ 3a). Apšvitinę tas dujas pakankamai trumpomis elektromagnetinėmis bangomis, pastebėsime, kad grandine ima tekėti elektros srovė. Vadinasi, elektromagnetinės bangos išlaisvina iš dujų molekulių elektronus, kurie juda teigiamai įelektrintos plokštelės link — išorine grandine teka elektros srovė (→ 3b). Netekusios elektronų, molekulės įgyja teigiamąjį krūvį (sakoma, kad jos yra *jonizuotos*), todėl neigiamai įelektrinta plokštelė jas traukia į save. Iš tos plokštelės gavusios elektronų, molekulės vėl tampa elektriškai neutraliomis. Kad elektronas būtų išlaisvintas iš molekulės, reikia jam suteikti tam tikrą kiekį energijos.

Elektromagnetinė spinduliuotė kažkada buvo laikoma banginiu reiškiniu. Tuomet manyta, kad silpna banga gali jonizuoti molekules tik per ilgesnį laiką ir, atvirkščiai, stiprus spinduliuotės srautas sukuria jonus per trumpą laiką. Iš tikrųjų taip nėra. Jonizacija beveik visada reiškiasi veikiant bangai. Silpna banga kas sekundę jonizuoja mažai molekulių, stipri — daug. Spinduliuotė veikia ne visas molekules kartu, o tik tam tikras atskiras molekules, tarsi ji būtų ne banga, o mažų dalelių — *fotonų* — srautas. Nustatyta, kad elektromagnetinės bangos gali elgtis kaip dalelės.

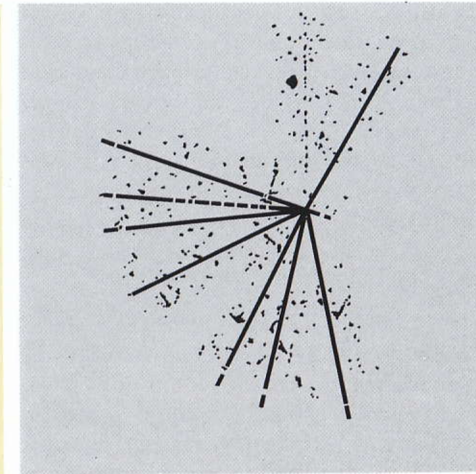
Fotoelektrinis efektas (fotoefektas)

Kitas analizuotinas reiškinys yra *fotoelektrinis efektas*. Pakankamai didelio dažnio banga, krisdama į metalo paviršių, išlaisvina iš jo elektronus (→ 4). Tai, kas vyksta *fotoelemente*, panašu į dujų jonizaciją. Kad elektronas būtų išlaisvintas, reikia jam suteikti tam tikrą mažiausią energiją, vadinamą *elektrono išlaisvinimo darbu*. Ši energija yra kiekvieno metalo parametras.
Suteikus metalui tokį kiekį energijos, elektronas išlekia iš metalo, neįgydamas kinetinės energijos. Jei metalas gauna daugiau energijos, elektronas dalį jos suvartoja, kad išlėktų iš metalo, o likusią dalį išlaiko kinetinės energijos pavidalu.
Panašiai atsitinka ir mechanikoje (→ 5): kad rutulėlis išriedėtų iš duobės, jam reikia suteikti energijos, pakankamos potenciniam gravitacijos barjerui įveikti.
Į metalo paviršių nukreipiant įvairaus dažnio elektromagnetines bangas, galima pastebėti, kad egzistuoja ribinis dažnis ν; mažesnio už jį dažnio bangos fotoelektrinio efekto nesukelia. Kai į metalą krintančios bangos dažnis yra mažesnis už ribinį, elektronų nepavyksta išlaisvinti netgi esant labai stipriai spinduliuotei. Bet jei krintančios bangos dažnis didesnis už ribinį (ν_0), elektronų emisija vyks visada ir bus tuo didesnė, kuo stipresnė spinduliuotė.

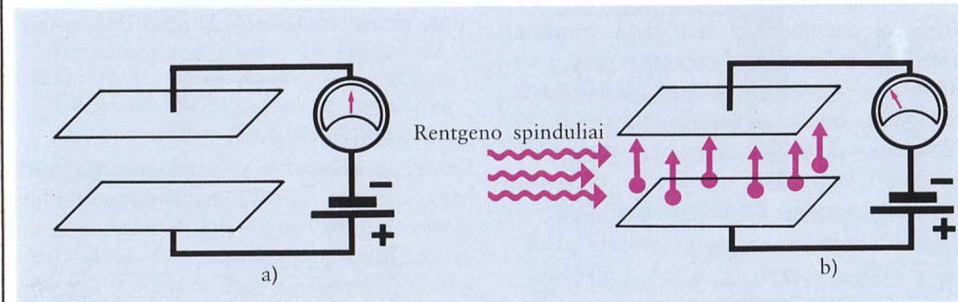
Jonizacija ir fotoelektra



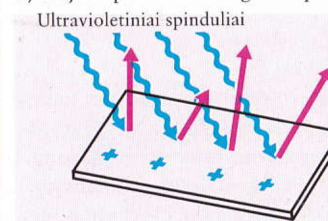
1. Judantį makroskopinį kūną (pavyzdžiui, stalo teniso kamuolėlį) galima matyti kiekvieną akimirką



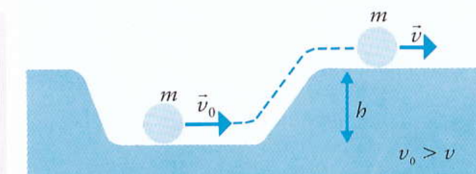
2. Mikroskopinių dalelių tiesiogiai matyti neįmanoma, galima tik nagrinėti pėdsakus, kuriuos jos palieka fotografinėje plokštelėje



3. Dujų jonizacija:
a) dvi plokšteles, tarp kurių yra dujų, prijungus prie įtampos šaltinio, elektros srovė neteka;
b) dujas apšvietus Rentgeno spinduliais, grandine ima tekėti elektros srovė



4. Fotoelektrinis efektas: metalo plokštelė, paveikta spindulių, emituoja elektronus ir įsielektrina teigiamai



5. Fotoelektriniam efektui analogiškas mechaninis reiškinys: kad nejudantis kūnas (rutulėlis) galėtų išlėkti iš duobės, jis turi įgyti pakankamai energijos

Ribinį dažnį atitinka atvejis, kai išlaisvinti elektronai neturi kinetinės energijos. Tai patvirtina, kad elektromagnetinė spinduliuotė sąveikauja su metalų paviršiumi kaip fotonų srautas, o ne kaip ištisinė banga. Tam tikru įtaisu (→ 1) galima išmatuoti didžiausią kinetinę energiją, kurią įgyja iš metalo paviršiaus išlaisvinti elektronai (fotoelektronai). Ji yra tiesiog proporcinga krintančios spinduliuotės dažnio ν ir ribinio dažnio ν_0 skirtumui:

$$E_k = h(\nu - \nu_0) = h\nu - h\nu_0.$$

Nors ν_0 priklauso nuo metalo rūšies, dydis h visada yra vienodas ($h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J · s). Jis vadinamas *Planko konstanta*. Šį reiškinį paaiškina M. Planko (M. Planck) *kvantinė teorija*, teigianti, kad kūnas spinduliuoja energiją mažais pliūpsniais — *kvantais*, kurių kiekvieno energija lygi $h\nu$. Vieną fotoną atitinka vienas kvantas, kurio energija proporcinga spinduliuotės dažniui ν.

Ši teorija padėjo A. Einšteinui (A. Einstein) paaiškinti fotoelektrinį efektą. Fotonas, kurio dažnis $\nu > \nu_0$, krisdamas į metalo paviršių, perduoda savo energiją elektronui. Šis, išlėkdamas iš metalo, netenka energijos kiekio $h\nu_0$. Likusi energijos dalis yra elektrono kinetinė energija. Taigi gauname:

$$h\nu = E_k + h\nu_0;$$

čia E_k — iš metalo, paveikto dažnio ν fotonais, išlaisvintų fotoelektronų kinetinė energija. Ši lygybė, vadinama *Einšteino fotoefekto lygtimi*, tenkina bandymų rezultatus ir patvirtina šviesos kvantinės teorijos teisingumą.

Elektrono kinetinė energija negali būti neigiama, todėl $\nu \geq \nu_0$. Taigi *kiekvienas fotoelektronų emisijos šaltinis turi ribinį dažnį ν_0; žemesnio už jį dažnio spinduliuotė negali išlaisvinti fotoelektronų* (pirmasis Einšteino dėsnis).

Intensyvinant krintančią spinduliuotę, didėja išlaisvintų fotoelektronų skaičius, bet ne tų elektronų kinetinė energija. Norint *padidinti E_k, reikia padidinti krintančios spinduliuotės dažnį* (antrasis Einšteino dėsnis; → 2).

Didelės energijos fotonai

Rentgeno spinduliai

Rentgeno spinduliai gali būti generuojami, greitiesiems elektronams susidūrus su metalu (→ 3). Po susidūrimo elektrono greitis sumažėja, taigi elektronas netenka kinetinės energijos. Viena jos dalis virsta šiluma, kurią sugeria metalas, kita — spinduliuotės energija. Potencialų skirtumo U pagreitintas elektronas, kurio krūvis e, įgyja kinetinės energijos, lygios eU. Tada

$$eU = h\nu + \text{šiluma};$$

čia $h\nu$ — išspinduliuoto fotono energija. Kai kurie elektronai visą savo kinetinę energiją išspinduliuoja fotonais. Šiuo atveju fotonų energija $h\nu = eU$, taigi ji yra didžiausia. Gautą Rentgeno spindulių srautą sudaro fotonai, kurių mažiausias bangos ilgis

$$\lambda_{min} = \frac{c}{\nu_{maks}} = \frac{ch}{eU};$$

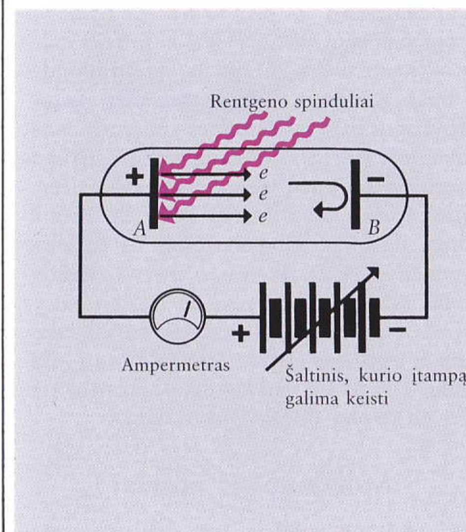
čia c — šviesos greitis.

Rentgeno spinduliai yra elektromagnetinės bangos, kurių ilgis daug mažesnis už regimosios šviesos bangos ilgį. Skiriasi ir jų savybės. Medžiagos, kurios yra neskaidrios šviesai, pavyzdžiui, medis, puikiausiai praleidžia Rentgeno spindulius (→ 4). Rentgeno spindulių taikymas žmogaus kūno sandarai tirti (→ 5) pagrįstas būtent šia jų savybe.

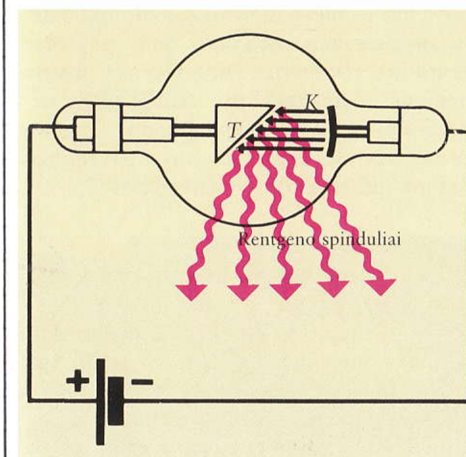
Komptono efektas

Nors Rentgeno spindulių atsiradimą galima paaiškinti remiantis elektromagnetizmo teorija, vis dėlto, susidurdami su elektronais, fotonai elgiasi kaip dalelės. Pakankamai energijos turintis fotonas ir elektronas susidūrę išsilaksto panašiai kaip du biliardo rutuliai (p. 75 → 1).

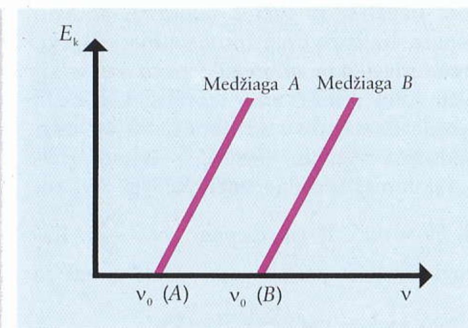
Rentgeno spinduliai



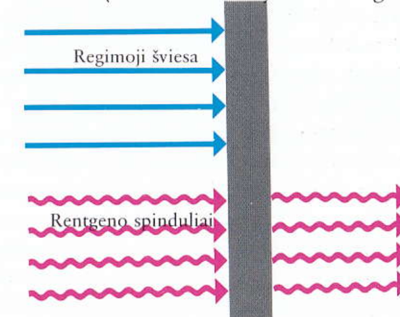
1. Įtaisas išspinduliuotų fotoelektronų didžiausiai kinetinei energijai matuoti. Įtampos šaltiniu keičiamas elektrodų A ir B potencialų skirtumas U: kai jis yra didesnis už ribinę įtampą U_m, elektros srovė neteka (ribinė įtampa susijusi su elektronų didžiausia kinetine energija)



4. Rentgeno vamzdis: išlėkę iš katodo K, elektronai susiduria su paviršiumi T, kuris dėl to skleidžia Rentgeno spindulius



2. Didžiausios kinetinės energijos priklausomybė nuo krintančios spinduliuotės dažnio yra tiesinė. Diagramos vaizduoja šią priklausomybę, atitinkančią du skirtingus metalus (ribinis dažnis yra skirtingas)



3. Rentgeno spindulių bangos ilgis yra daug mažesnis negu regimosios šviesos, todėl jie praeina pro šviesai neskaidrias medžiagas



5. Rentgenograma rodo, kad Rentgeno spinduliai prasiskverbia pro neskaidrius kūnus

Dalelių kinetinė energija ir judesio kiekis kinta pagal tuos pačius tampraus smūgio dėsnius. Kalbant apie fotono judesio kiekį, pirmiausia reikia apibrėžti *fotono masės* sąvoką. Anot reliatyvumo teorijos, kiekvieną energiją E atitinka tam tikra masė m, taigi tenkinama lygtis $E = mc^2$ (c — šviesos greitis vakuume). Fotono energija lygi $h\nu$, todėl $h\nu = mc^2$. Iš čia turime: $m = \frac{h\nu}{c^2}$. Kadangi fotonas juda šviesos greičiu, tai jo judesio kiekis $mc = \frac{h\nu}{c}$.

Dalelės ir bangos dvejopumas

Žinome, jog, atliekant vienus bandymus, elektromagnetinė spinduliuotė reiškiasi kaip banga, o atliekant kitus — kaip dalelės. Netgi tokios mikroskopinės dalelės, kaip elektronai, turi bangų savybių, kurios išryškėja atliekant difrakcijos eksperimentą.

Difrakcija yra banginių reiškinių požymis. Tačiau, kad ji galėtų vykti, kliūtys turi būti tokio pat dydžio, kaip spinduliuotės bangos ilgis. Taigi, apšvietę kristalus Rentgeno spinduliais (kurių bangos ilgis yra 10^{-9} m ir dar mažesnis), jų difrakciją galėsime stebėti tik tada, kai atstumai tarp kristalografinių plokštumų bus tokio pat dydžio, kaip ir Rentgeno spindulių bangos ilgis. Iš tikrųjų siauras Rentgeno spindulių pluoštas dėl difrakcijos (kuri vyksta taikant Debajaus ir Šererio metodą) suformuoja būdingus difrakcinius žiedus. Išmatavus jų skersmenį, galima labai tiksliai apskaičiuoti bangos ilgį (→ 2).

1927 metais anglų fizikai Dž. P. Tomsonas (J. P. Thomson) ir Rydas (Reid) atliko elektronų difrakcijos eksperimentus (→ 3, 4).

Idėją, kuri sudarė sąlygas atlikti šiuos eksperimentus, 1924 metais iškėlė prancūzų fizikas L. de Broilis (L. de Broglie): jei fotonas turi judesio kiekį $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$, tai kiekvieną dalelę, kurios judesio kiekis p, atitinka bangos ilgis $\lambda = \frac{h}{p}$. Vadinasi, tam tikrais atvejais dalelė gali elgtis kaip banga, kuri apibūdinama *de Broilio bangos ilgiu*.

Tyrinėjant neturinčių elektros krūvio dalelių — neutronų — difrakciją, de Broilio idėja buvo galutinai patvirtinta.

Medžiagos banginės savybės yra svarbios tik tada, kai de Broilio bangos ilgis artimas nagrinėjamų kūnų geometriniams matmenims. Įprastinių judančių kūnų de Broilio bangų ilgis yra daug mažesnis už tų kūnų matmenis (→ 5). Tomsono ir Rydo bandymams naudotų elektronų de Broilio bangų ilgis buvo $7 \cdot 10^{-9}$ m, taigi tos pačios eilės, kaip ir atstumas tarp kristalografinių plokštumų. Dėl to šie mokslininkai ir galėjo stebėti elektronų difrakcijos reiškinį.

Molekulės ir atomai

Tarkime, kad vandens lašą dalijame į mažiausias dalis, dar išlaikančias visas vandens savybes. Tam tikru momentu priartėtume prie dalelės, kurią padaliję, jau gautume daleles, turinčias visai kitokių savybių. Ta mažiausia dalelė yra vandens *molekulė*. Iš tikrųjų molekulė yra mažiausia cheminio junginio dalis, išlaikanti to junginio savybes.

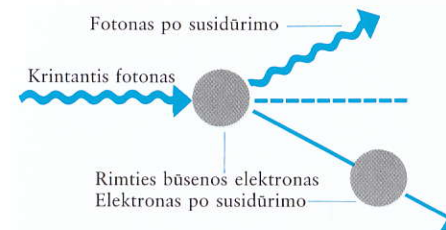
Dalydami vandens molekulę, gautume daleles, nesudarančias junginio, taigi gautume *cheminius elementus*. Nagrinėjamu atveju cheminiai elementai būtų vandenilis ir deguonis. Vienu metu manyta, kad tos dalelės yra nedalomos. Todėl jos buvo pavadintos *atomais* (gr. *atomos* — nedalomas).

Atomų modeliai

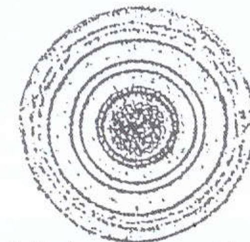
Galime manyti, kad bet kokia medžiaga yra ne kas kita, kaip elementariųjų dalelių — atomų — rinkinys. Vis dėlto fotoelektrinis efektas ir daugelis kitų reiškinių rodo, kad medžiagos ir atomai turi elektronų.

Jei pati medžiaga elektriškai neutrali, tai joje, be elektronų, yra teigiamųjų elektringųjų dalelių, kurių krūvis atsveria neigiamą elektronų krūvį. Elektronus nesunku emituoti, šildant metalą (termoelektroninė emisija),

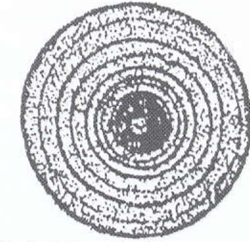
Dalelės ir bangos dvejopumas



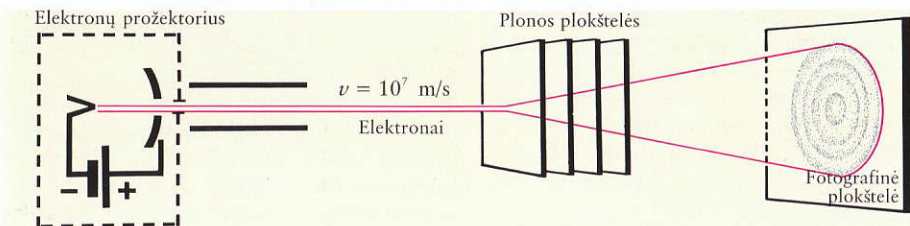
1. Komptono efektas: susidūrę su elektronais, fotonai elgiasi kaip dalelės. Fotonas atitinka dalelę, kurios masė $\frac{h\nu}{c^2}$; elektronas yra dalelė, kurios masė lygi $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg. Po susidūrimo ekvivalenčioji fotono masė sumažėja



2. Dėl dalelių banginių savybių, Rentgeno spindulių pluoštui praėjus pro metalinę plokštelę, gaunamas toks difrakcinis vaizdas (Rentgeno spindulių bangos ilgis $\lambda = 0{,}154$ nm)



3. Difrakcinis vaizdas, gautas į metalinę plokštelę nukreipus elektronų pluoštą (elektronų de Broilio bangos ilgis $\lambda = 6$ pm)



4. Tomsono ir Rydo bandymas: 10^7 m/s greičiu lekiančių elektronų pluoštas praeina pro keletą metalinių plokštelių ir apšviečia fotografinę plokštelę



5. Medžiagos banginės savybės išryškėja tada, kai bangos ilgis yra tokio pat didumo, kaip ir iš tos medžiagos padaryto kūno matmenys. 500 kg masės automobilio, važiuojančio 200 km/h greičiu, de Broilio bangos ilgis yra apie 10^{38} kartų mažesnis už automobilio ilgį

jį apšviečiant (fotoelektroninė emisija) ir t. t. Tuo tarpu teigiamąsias elektringąsias daleles nelengva pašalinti iš atomų, mat jos stipriai susijusios su atomu. Visa tai leido Dž. Dž. Tomsonui 1903 m. sukurti pirmąjį atomo modelį (→ 1). Vėliau (1911 m.), norėdamas tai patikrinti, E. Rezerfordas (E. Rutherford) atliko kitą eksperimentą (→ 2) — metalo lakštelį apšvietė radioaktyviojo kūno išspinduliuotomis greitosiomis *alfa dalelėmis* (jų krūvis yra teigiamas ir dvigubai didesnis už elektrono krūvį).

Jeigu atomas būtų sudarytas taip, kaip numatė Dž. Dž. Tomsonas, tai silpnas elektrinis laukas tik nedaug išsklaidytų alfa daleles (→ 3). Gauti eksperimento rezultatai prieštaravo šiam spėjimui. Dauguma alfa dalelių iš tiesų praėjo pro lakštelį smarkiai neišsisklaidydamos (tai rodė, kad atome yra daug tuščios erdvės). Tačiau nedidelė dalis jų nukrypo nuo tiesaus kelio, o kai kurios — netgi labai daug, patvirtindamos, kad atome yra stiprių lokalizuotų elektrinių laukų. E. Rezerfordas gautą rezultatą aiškino visai kitokia atomo sandara. Taigi jis pasiūlė tokį atomo modelį: atomas sudarytas iš jo centre esančio branduolio, kurio krūvis yra teigiamas ir kuriame sutelkta praktiškai visa atomo masė, bei elektronų, kurie skrieja aplink branduolį, sudarydami tarsi mažytę planetų sistemą. Pagal šį modelį, atomas turi būti didesnis už branduolį, nes tarp branduolio ir aplink jį skriejančių elektronų yra tuščia erdvė (→ 4).

Remiantis Rezerfordo atomo modeliu, nesunku paaiškinti, kodėl tos alfa dalelės, kurios lekia toli nuo branduolio, savo trajektorijos nekeičia, tuo tarpu skriejančios arti branduolio išsklaidomos smarkiau (→ 5). Rezerfordo modelis ne tik puikiai paaiškino eksperimento rezultatus, bet ir atitiko teorinius skaičiavimus.

Paprasčiausias įmanomas nagrinėti atomas yra vandenilio atomas. Jis turi tik vieną „planetinį" elektroną. Vandenilio atomo branduolio masė yra 1836 kartus didesnė už elektrono masę, o krūvis — tokio pat didumo, bet priešingo ženklo (teigiamas). Šis branduolys dar vadinamas *protonu*. Tai viena svarbiausių elementariųjų dalelių.

Elektrono kinetinę energiją galima išreikšti labai paprasta formule:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r}.$$

Protono sukurto elektrostatinio lauko potencialas $\varphi = \frac{e}{4\pi\varepsilon_0 r}$; elektrono potencinė energija $E_p = -e\varphi = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$. Vadinasi, visa elektrono energija

$$E = E_k + E_p = -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r}.$$

Minuso ženklas šioje lygybėje rodo: kad elektronas būtų perkeltas į begalybę (t. y. kad būtų įveikta protono traukos jėga), reikia atlikti neigiamą darbą. Iš paskutiniosios lygybės

$$r = -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 E}.$$

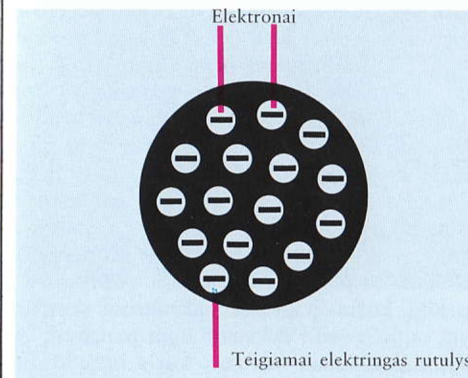
Taigi kiekvieną energijos vertę atitinka tam tikras apibrėžtas elektrono orbitos spindulys. Tačiau planetinis atomo modelis, kaip ir Tomsono modelis, yra ribotas. Elektromagnetizmo teorija teigia, kad su pagreičiu judanti elektringoji dalelė, pavyzdžiui, elektronas Rezerfordo modelio atome, spinduliuoja elektromagnetines bangas ir dėl to netenka kinetinės energijos. Vadinasi, elektrono trajektorija turėtų būti susisukanti link branduolio spiralė (→ 6b). Planetinio modelio, patvirtinto Rezerfordo bandymais, ir elektromagnetizmo teorijos, pagrįstos tiksliais bandymais, neatitikimas pareikalavo iš esmės peržiūrėti klasikinę mechaniką.

Boro atomo modelis

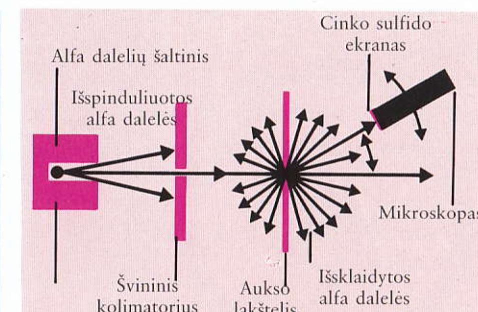
Išnagrinėkime vandenilio atome skriejantį elektroną, remdamiesi bangine teorija. Anot jos, elektronui priskiriama de Broilio banga, sklindanti išilgai orbitos. Orbitos ilgis turi būti lygus sveikam de Broilio bangų ilgių skaičiui, kitaip bangos pradingtų (nesusidarytų interferencijos maksimumas) ir nebeliktų elektrono (p. 79 → 1). Vadinasi,

$$2\pi r = n\lambda, \text{ arba } 2\pi r = n\frac{h}{mv}.$$

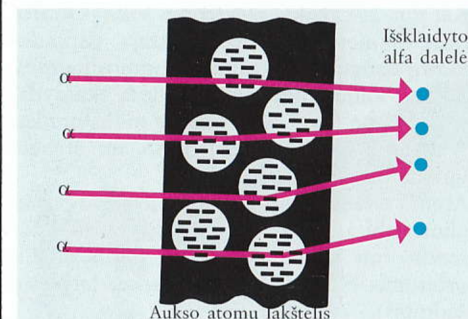
Atomų modeliai



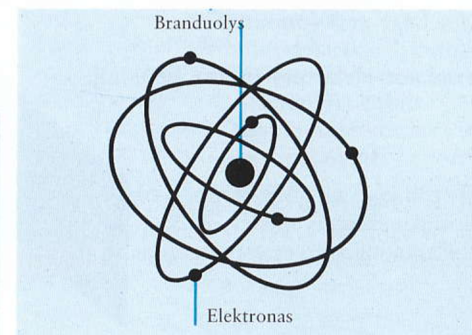
1. Tomsono atomo modelis. Teigiamasis atomo krūvis pasiskirstęs visame atome



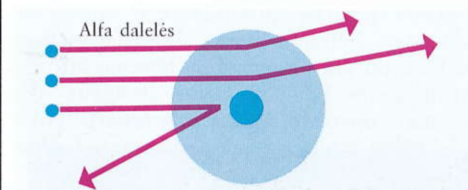
2. Įrenginio atomo sandarai tirti alfa dalelėmis schema



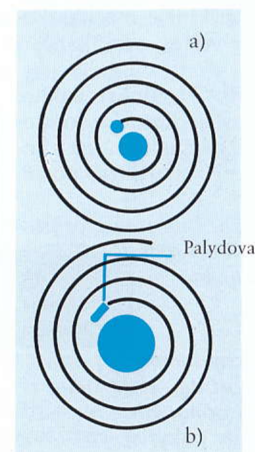
3. Tomsono modelio atomai turi silpną elektrinį lauką, kuris nedaug iškreivintų alfa dalelių trajektoriją



4. Rezerfordo planetinis atomo modelis. Teigiamai elektringas branduolys yra elektronų orbitų centre



5. Planetinis modelis tiksliai paaiškina alfa dalelių išsklaidymą: lėkdamos netoli branduolio, alfa dalelės smarkiai nukrypsta nuo tiesaus kelio, priešingu atveju branduolio įtaka yra nedidelė ir dalelės trajektorija iškreivinama mažai



6. Pagal elektromagnetizmo teoriją, su pagreičiu judantis elektronas, skriedamas aplink branduolį, netenka kinetinės energijos: jo trajektorija turėtų būti branduolio link susisukanti spiralė (a). Panašiai dėl trinties į atmosferą mažėja ir dirbtinio Žemės palydovo greitis (b)

Iš čia
$$mvr = n\frac{h}{2\pi}.$$
Kadangi n turi būti sveikasis skaičius, tai mvr (elektrono judesio kiekio momentas) *gali įgyti tik kartotines* $\frac{h}{2\pi}$ *vertes*; taigi tos vertės yra *diskretiškos*.

Skaičius n vadinamas *pagrindiniu kvantiniu skaičiumi*. Judesio kiekio momentą išreiškiančios lygybės abi puses pakėlę kvadratu, gauname:
$$m^2v^2r^2 = \frac{n^2h^2}{4\pi^2}.$$
Padaliję šią lygybę iš kinetinės energijos išraiškos
$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r},$$
randame elektrono orbitos spindulį:
$$r = \frac{\varepsilon_0 n^2 h^2}{\pi m e^2}.$$
Jis gali įgyti ne visas vertes, o tik tas, kurios atitinka skaičius n = 1, 2, 3, ... Įrašę orbitos spindulio r vertę į energijos išraišką
$$E = -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r},$$
gauname:
$$E = \left(-\frac{me^4}{8\varepsilon^2h^2}\right)\frac{1}{n^2}.$$
Taigi atomo energija įgyja ne tolydžiai kintančias vertes (kaip klasikinėje mechanikoje), bet tik diskretiškas vertes, atitinkančias skirtingas n reikšmes.

Danų fizikas N. Boras (N. Bohr) sukūrė atomo modelį, kuris susieja Rezerfordo atomo teoriją su de Broilio bangų kvantine samprata. Boro teorijos esmę sudaro trys postulatai:

1) *elektronai skrieja stacionariomis orbitomis nespinduliuodami energijos* (→ 2);

2) *elektrono judesio kiekio momentas yra dydžio* $\frac{h}{2\pi}$ *kartotinis;*

3) *peršokdamas iš didesnės energijos orbitos į mažesnės energijos orbitą, elektronas išspinduliuoja dažnio* ν *fotoną, kurio* $h\nu = \Delta E$ (ΔE — atomo energijos pokytis).

Trečiasis postulatas tampa aiškus kvantinės teorijos kontekste. Elektronas gali pereiti iš vienos orbitos į kitą (kitokio spindulio orbitą) tik šuoliais; jei būtų kitaip (t. y. jei elektronas pereitų iš vienos orbitos į kitą spiraline trajektorija), jo judėjimo kreivės spindulys įgytų draudžiamas vertes. Tuo tarpu elektrono energija pakinta staiga ir tas energijos pokytis išspinduliuojamas fotono pavidalu.

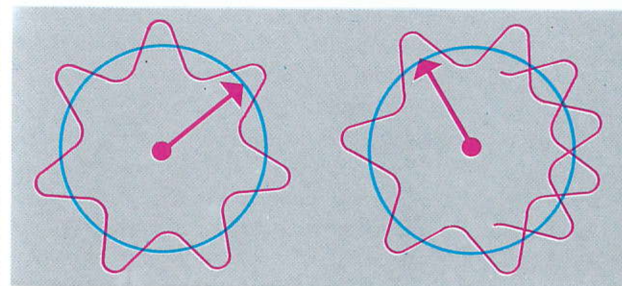
Sakykime, elektronas peršoka iš orbitos, atitinkančios pagrindinį kvantinį skaičių n', į orbitą, kurios pagrindinis kvantinis skaičius yra n ($n' > n$). Vykstant šiam procesui, išspinduliuojamas fotonas, kuris įgyja dažnį ν, taigi fotono energija
$$h\nu = \left(-\frac{me^4}{8\varepsilon^2h^2}\right)\left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2}\right).$$
Kai n = 2, t. y. kai elektronas šoka iš kurios nors tolimesnės orbitos į antrąją, išspinduliuotų bangų ilgis atitinka regimuosius spindulius. Vandenilio lempos šviesą skaidydamas prizme (→ 3, 4), šveicarų mokslininkas J. Balmeris (J. Balmer) 1885 m. stebėjo būtent tokius spindulius.

Atomo elektronas, judantis mažiausios energijos orbita (n = 1), yra *pagrindinės būsenos*, tuo tarpu skriejantis tolimesnėmis orbitomis — *sužadintosios būsenos* (arba sužadintas).

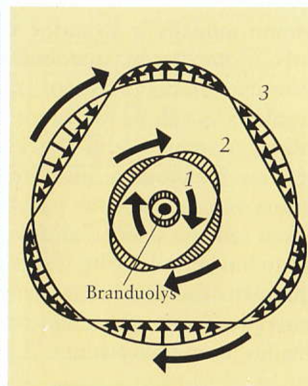
Sužadinti atomai negali ilgai gyvuoti, todėl per trumpą laiką jie pereina į mažesnės energijos būseną ir pagaliau pasiekia pagrindinę būseną. Tokių atomų elektronų šuoliai iš tolimesnių orbitų į orbitą, kurios n = 2, sukelia regimąją spinduliuotę ir sudaro vadinamąją *Balmerio seriją*. Šuoliai į pirmąją orbitą, tai yra į pagrindinę būseną, atitinka trumpesnes bangas, kurių žmogaus akis nemato (*ultravioletiniai spinduliai*). Tokie elektronų šuoliai sudaro vadinamąją *Laimano seriją*.

Elektronams peršokant iš tolimesnių orbitų į trečiąją, ketvirtąją ir penktąją orbitą, spinduliuojamos ilgesnės už regimąją šviesą bangos (*infraraudonieji spinduliai*). Tie šuoliai sudaro vadinamąsias *Pašeno, Brekecto ir Pfundo serijas* (→ 5).

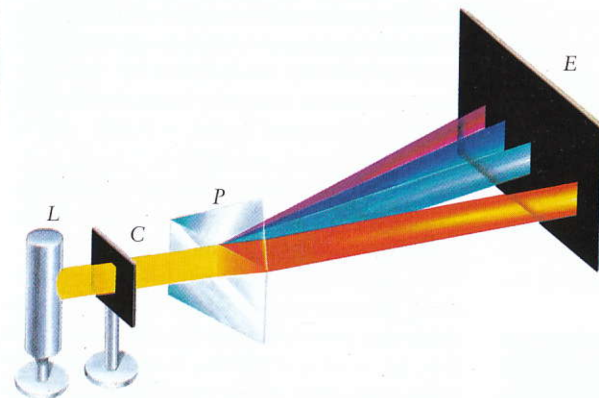
Boro atomo modelis



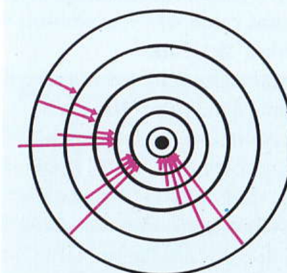
1. Vandenilio atomo elektrono banginis pobūdis: jo orbitos ilgis turi būti bangos ilgio kartotinis (kairėje), kitaip elektronas dėl interferencijos išnyktų (dešinėje)



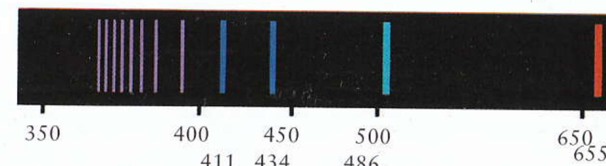
2. Pirmosios trys vandenilio atomo elektrono orbitos (modelyje elektronas juda stacionaria orbita, nespinduliuodamas energijos)



3. Įtaiso vandenilio lempos L skleidžiamos šviesos spektrui matuoti schema. Šviesa pro plyšį C patenka į prizmę P, kuri ją išskaido į skirtingų spalvų pluoštelius (matomus ekrane E)



5. Vandenilio spektro serijos. Čia pavaizduoti elektronų šuoliai iš įvairių orbitų sudaro penkias spektro serijas. Brėžiant orbitų spindulius, vienodo mastelio nesilaikyta



4. Vandenilio spektro Balmerio serija (bangos ilgis nurodytas nanometrais; 1 nm = 10^{-9} m)

Branduolio fizika

Atomo modelis ir kvantinė mechanika

Boro atomo teoriją patobulino modernioji kvantinės mechanikos teorija, teigianti, kad negalima begaliniu tikslumu nustatyti submikroskopinių dalelių trajektorijų (klasikinėje mechanikoje tai įmanoma). Vandenilio atomą vaizduojančiame paveiksle (→ 1) didesnis taškelių skaičius atitinka didesnę elektrono buvimo tikimybę. Taigi tiksliau galime apibrėžti tik leistinąsias energijos vertes (energijos lygmenis). Elektrono šuoliai vandenilio atome pavaizduoti 2 paveiksle.

Atomo branduolys

Atomų cheminės savybės priklauso nuo išoriniame lygmenyje esančių elektronų skaičiaus. Tačiau gali pakisti ir branduolio teigiamasis krūvis bei elektronų, kompensuojančių tą krūvį, skaičius. Tokiu būdu galima pagaminti elementą, kurio iš pradžių nebuvo.

Apibrėžkime kai kurias sąvokas, susijusias su atomo branduoliu: *nukleonas* — sudedamoji branduolio dalelė; *masės skaičius* (žymimas raide *A*) — branduolį sudarančių nukleonų skaičius.

Branduolio masė visada apytiksliai lygi sveikajam skaičiui protono masių. Taigi būtų galima tvirtinti, kad atomų branduoliai sudaryti iš protonų. Bet 1932 metais anglų fizikas Dž. Čadvikas (J. Chadwick) atrado atomų branduoliuose dar vienos rūšies dalelių, kurių kiekvienos masė labai artima protono masei. Kadangi ši dalelė neturi elektros krūvio, tai ji buvo pavadinta *neutronu*.

Bandymais nustatyta, kad atomų branduoliai susideda iš protonų ir neutronų. *Atominis skaičius* (žymimas raide *Z*) rodo, kiek protonų yra branduolyje. Atomų branduoliai, kurių atominis skaičius toks pat, gali turėti skirtingą skaičių neutronų. Tokių atomų cheminės savybės yra vienodos, tačiau masė skirtinga. Šie atomai vadinami *izotopais*.

Cheminio elemento E branduolys žymimas tą elementą atitinkančia raide (E), o jos kairėje pusėje rašomi du indeksai: apatinis rodo atominį skaičių, viršutinis — masės skaičių, pavyzdžiui, ${}^{A}_{Z}E$.

Trys vandenilio izotopai užrašomi taip: ${}^{1}_{1}H$, ${}^{2}_{1}H$, ${}^{3}_{1}H$. Pirmasis iš jų — įprastas vandenilis, plačiausiai paplitęs gamtoje. Jo branduolys turi tik vieną protoną. Antrasis yra *deuteris*, o trečiasis — *tritis*. Jie turi po vieną protoną ir po vieną (deuteris) arba du (tritis) neutronus (→ 3).

Gamtoje yra ir daugiau cheminių elementų, kurie turi po keletą izotopų, pavyzdžiui, anglis: ${}^{12}_{6}C$, ${}^{13}_{6}C$ ir kt. Pirmasis iš šių izotopų (→ 4) turi šešis protonus ir šešis neutronus. Dvyliktoji tokio anglies atomo masės dalis vadinama *santykinės atominės masės* vienetu. Jis žymimas raide u (1 u = $1{,}6603 \cdot 10^{-27}$ kg). Elektrono, protono ir neutrono masė, išreikšta šiuo vienetu, atitinkamai lygi $m_e = 5{,}486 \cdot 10^{-4}$ u; $m_p = 1{,}0073$ u; $m_n = 1{,}0087$ u.

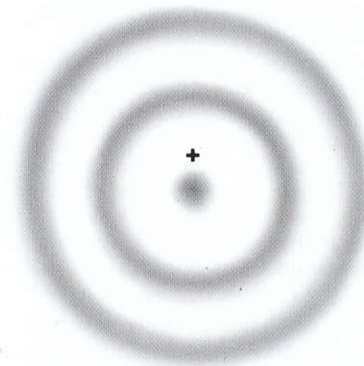
Iš Rezerfordo bandymų išplaukia, kad branduolio spindulys yra apie 10^{-15} m, taigi jis 10^5 kartų mažesnis už atomo spindulį.

Dėl Kulono jėgos poveikio branduolio protonai mėgintų atitolti vienas nuo kito. Jeigu nukleonų neveiktų kitos jėgos, susiejančios juos, tai nebūtų ir stabilių branduolių. Tada reikia atsižvelgti į kitos sąveikos, vadinamos *stipriąja sąveika*, įtaką. Mažesniu už branduolio spindulį atstumu ji yra labai veiksminga, tuo tarpu kai tas atstumas didesnis, beveik nejuntama.

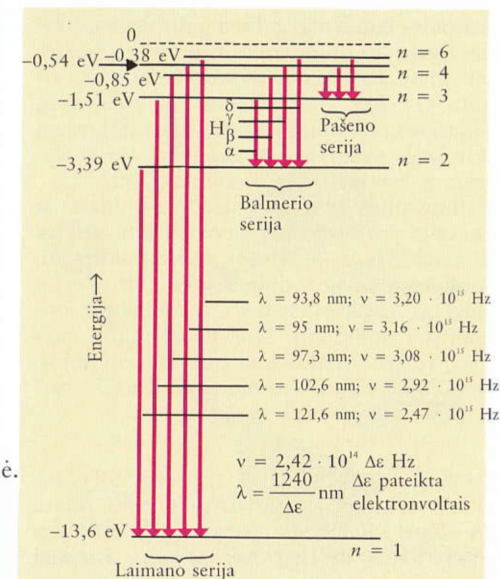
Paveiksle pavaizduotos grafinės dviejų nukleonų Kulono sąveikos jėgos ir stipriosios sąveikos jėgos priklausomybės nuo atstumo tarp nukleonų (→ 5).

Nesunku pastebėti: kai $r \leq 2 \cdot 10^{-13}$ cm, vyrauja stiprioji sąveika, o kai $r \geq 2 \cdot 10^{-13}$ cm, egzistuoja vien Kulono sąveika. Kulono sąveika būdinga tik įelektrintoms dalelėms, o stiprioji — visiems nukleonams. Branduolyje traukos jėga yra tuo stipresnė, kuo didesnis branduolio nukleonų skaičius.

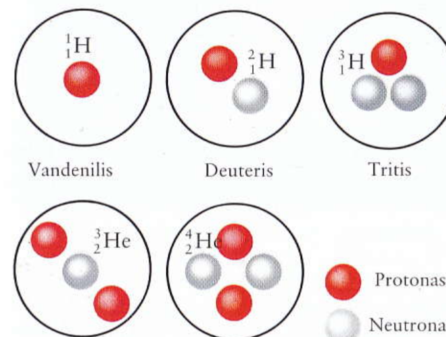
Kvantinė mechanika



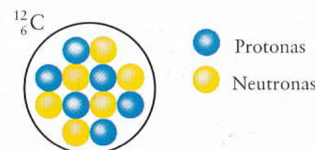
1. Kvantinė mechanika nustato sritis, kuriose tikimybė rasti elektroną yra didesnė. Vandenilio atomą ji vaizduoja taip, kaip parodyta šiame paveiksle



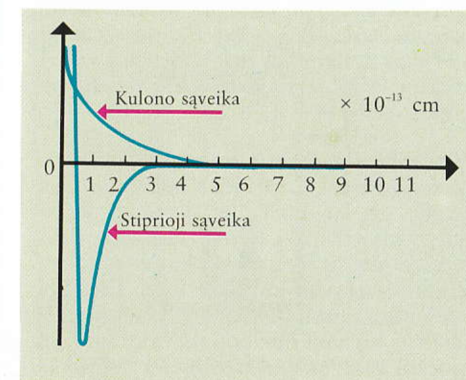
2. Vandenilio atomo elektrono „orbitinių šuolių“, sudarančių pirmąsias spektro serijas, scheminis vaizdas. Išspinduliuotos šviesos bangų ilgis yra toks, kokį numatė Boro atomo teorija



3. Cheminio elemento izotopai skiriasi vieni nuo kitų masės skaičiumi. Viršuje — trys vandenilio izotopai, apačioje — du helio izotopai



4. Anglies ${}^{12}_{6}C$ atomo branduolys



5. Dviejų nukleonų Kulono sąveikos jėgos ir stipriosios sąveikos jėgos priklausomybė nuo atstumo tarp nukleonų. Atstumu, didesniu už atomo matmenis, stipriosios sąveikos beveik nėra

Branduolinė energija

Atliekant bandymą, galima pakankamai tiksliai išmatuoti branduolių ir jų atskirų nukleonų masę. Paaiškėja, kad branduolio masė visada yra šiek tiek mažesnė už nukleonų, sudarančių branduolį, masių sumą. Šis masių skirtumas vadinamas branduolio *masės defektu* ir žymimas Δm. Kodėl taip yra?

Reliatyvumo teorija teigia, kad masė ir energija yra susijusios viena su kita sąryšiu $E = mc^2$ (čia c — šviesos greitis vakuume). Anot šios teorijos, dingusi masė virto *ryšio energija* ΔE, kuri išsiskyrė nukleonams jungiantis į branduolį. Norint branduolį išardyti, reikia suteikti jam tiek pat energijos. Branduolys, kurio atominis skaičius Z, turi Z protonų. Jų masė lygi

$$Zm_p.$$

Jei A yra masės skaičius, tai branduolys turi $A-Z$ neutronų, kurių bendra masė $(A-Z)m_n$. Raide m_b pažymėję branduolio masę, masės defektą Δm galėsime išreikšti taip:

$$\Delta m = Zm_p + (A-Z)\,m_n - m_b.$$

Iš energijos ir masės sąryšio išplaukia, kad atominės masės vienetą atitinka energija, lygi 931 MeV, todėl branduolio ryšio energija

$$\Delta E = 931\ (Zm_p + (A-Z)\,m_n - m_b)\ [\mathrm{MeV}].$$

Tie branduoliai, kurių kiekvienam nukleonui tenka didesnė ryšio energija, yra stabilesni, nes jiems suskaidyti reikia didesnės energijos. Tokių branduolių masės skaičius yra vidutinis, o ryšio energija, tenkanti vienam nukleonui, siekia apie 8,75 MeV (→ 1).

Branduolių dalijimasis ir jungimasis

Urano izotopo U-235 vieno nukleono ryšio energija yra 7,6 MeV. Jei šį branduolį pavyktų padalyti į dvi beveik vienodas dalis, gautume du branduolius, kurie atsidurtų kreivės (→ 1) maksimumo srityje. Tada abu branduoliai turėtų didžiausią ryšio energiją, tenkančią vienam nukleonui. Vykstant šiam procesui, vadinamam *branduolių dalijimusi* (→ 2), išsiskiria didelis kiekis energijos (kiek mažiau negu 200 MeV). Sprogus atominei bombai, dalijasi ne vienas, o nepaprastai daug urano branduolių ir dėl to išsiskiria milžiniška energija, kuri sukelia katastrofą (→ 3).

Norėdami dar labiau padidinti ryšio energiją, tenkančią vienam nukleonui, taigi ir dalijimosi reakcijos metu išsiskyrusį energijos kiekį, galime vandenilį paversti helio izotopu, kurio masės skaičius 4.

Keturi protonai gali susijungti sudarydami helio branduolį, kurio masės skaičius 4, bei du teigiamuosius elektronus (pozitronus) ir išskirdami 27,7 MeV energijos (→ 4). Šiuo reiškiniu remiamasi gaminant vandenilinę bombą (kitaip dar vadinamą H bomba). Šiam jungimuisi realizuoti reikia be galo aukštos temperatūros, o ją galima gauti sprogdinant atominę bombą, kuri dalijimosi metu veikia kaip degtuvas.

Radioaktyvumas

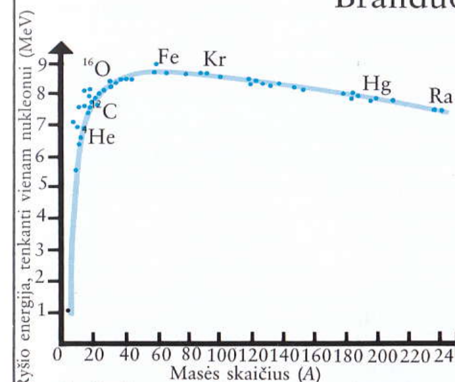
Prancūzų fizikas A. Bekerelis (A. Becquerel) 1896 metais pastebėjo, kad jo laboratorijoje esančios tam tikros medžiagos (vėliau pavadintos *radioaktyviosiomis*) apšviesdavo, kartais net iki juodumo, į metalines dėžutes sudėtas fotografines plokšteles. Gamtoje randama daug radioaktyviųjų elementų. Jeigu vieną iš jų (ar vieną iš jų druskų) įdėsime į švininį indą, kuriame yra kiaurymė, tai pro tą kiaurymę ims sklisti spinduliai. Veikiami magnetinio lauko, jie suskils į tris pluoštus: *alfa* (α), *beta* (β) ir *gama* (γ) *spindulių* (→ 5). Alfa spindulių pluoštas nukryps kaip teigiamieji elektros krūvininkai. Šie spinduliai sudaryti iš helio atomų branduolių (dviejų protonų ir dviejų neutronų) ir vadinami *alfa dalelėmis*.

Beta spindulių pluoštas magnetiniame lauke nukrypsta kaip neigiamieji krūvininkai. Šie spinduliai sudaryti iš elektronų ir vadinami *beta dalelėmis* (iš čia kilęs ir elektronų greitintuvo — betatrono — pavadinimas).

Pagaliau turime gama spindulius, kurių neveikia nei magnetinis, nei elektrinis laukas. Gama spinduliai yra elektromagnetinės bangos, t. y. fotonai, kurių bangos ilgis lygus Rentgeno spindulių bangos ilgiui arba yra už jį mažesnis. Šių fotonų energija yra tokio pat didumo, kaip Rentgeno spindulių, arba didesnė. Tai priklauso nuo juos spinduliuojančio elemento.

Kiekvienas radioaktyvusis elementas (išimčių yra nedaug) skildamas išspinduliuoja vieną alfa arba vieną beta dalelę (visada arba alfa, arba beta dalelę), o kartu su jomis

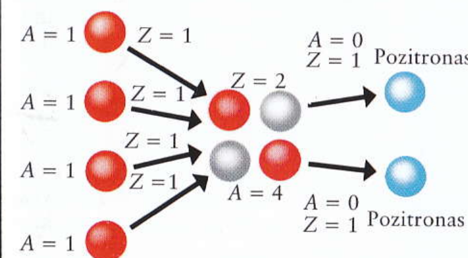
Branduolinė energija



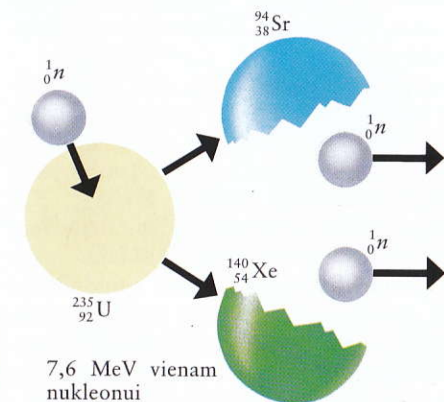
1. Ryšio energijos, tenkančios vienam nukleonui, priklausomybė nuo branduolio dalelių skaičiaus



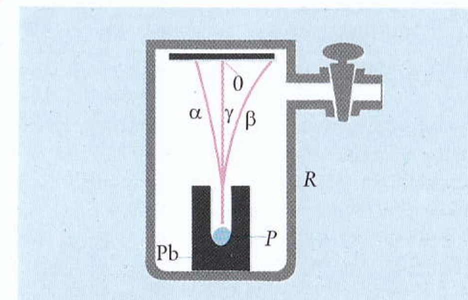
3. Atominės bombos sprogimas



4. Branduolinė reakcija: jungiantis keturiems protonams, susidaro helio $^{4}_{2}\mathrm{He}$ branduolys ir du pozitronai (teigiamieji elektronai)



2. Branduolinė reakcija: $^{235}_{92}\mathrm{U}$ branduolys dalydamasis išskiria daug energijos ir suformuoja du branduolius, kurių bendra masė beveik lygi urano branduolio masei

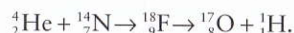


5. Gamtinio radioaktyvumo pavyzdys. Į indą R, iš kurio išsiurbtas oras, įstatytas švininis indas, o į jį įdėtas radioaktyvusis kūnas P. Veikiamas magnetinio lauko, radioaktyviosios medžiagos skleidžiamas spindulių pluoštas suskyla į tris pluoštelius: alfa (α), beta (β) ir gama (γ) spindulių

ir gama spindulius. Kadangi branduolių skilimo teorija gana sudėtinga, apsiribosime tik kai kuriais jos teiginiais.
Branduolyje du protonai ir du neutronai gali susijungti sudarydami vieną alfa dalelę, kurios ryšio energija, tenkanti vienam nukleonui, pakankamai didelė, taigi alfa dalelė yra stabili.
Sunkaus branduolio viduje alfa dalelę veikia potencialas φ (→ 1). Paprastai ši dalelė galėtų išlėkti iš branduolio tik tada, jei jos energija būtų didesnė už φ_{maks}. Tuo tarpu ji išlekia ir turėdama energiją $E < \varphi_{maks}$. Remiantis kvantine teorija, šį spinduliavimą galima paaiškinti tuneliniu reiškiniu.
Kiekvienas branduolys, kuris spinduliuoja alfa daleles, turi apibrėžtą radioaktyviojo skilimo trukmę, o pačios alfa dalelės — apibrėžtą spinduliuotės kinetinę energiją. Ji ir yra radioaktyviojo šaltinio charakteristika.
Beta skilimo savybės kitokios nei alfa skilimo. Jis būdingas ne tik radioaktyviesiems branduoliams, bet ir elementariosioms dalelėms, kaip antai neutronams. Laisvojo neutrono skilimo pusamžis lygus 10,8 min (→ 3). Beta skilimas panašiai vyksta ir radioaktyviojo branduolio viduje (→ 4).
Energija, kuri išsiskiria skylant laisvajam neutronui, sudaro apie 0,8 MeV ir pasidalija tarp visų skilimo metu atsiradusių dalelių. Radioaktyviojo elemento elektronų energija paprastai yra pasiskirsčiusi tam tikru būdu (→ 5). Kiekvienas branduolio skilimas, kurio metu išmetami elektronai, yra beta skilimas.
Nesunku suvokti, kad elemento, išspinduliavusio alfa dalelę, atominis skaičius sumažėja dviem vienetais, o masės skaičius — keturiais vienetais. Taigi šis elementas virsta kitu elementu. Netgi vykstant beta skilimui, vienas elementas virsta kitu. Pavyzdžiui, litis (^3_8Li), kurio branduolyje yra 3 protonai ir 5 neutronai, o masės skaičius lygus 8 (→ 4), beta skilimo metu virsta beriliu (^8_4Be), nes vienas neutronas virsta protonu. Naujasis branduolys turi 4 protonus ir 4 neutronus, jo atominis skaičius padidėja vienetu, o masės skaičius lieka toks pat, t. y. lygus 8.
Esant tam tikram apibrėžtam radioaktyviojo elemento kiekiui, tinkamomis sąlygomis atomai skyla vienas paskui kitą, o ne visi kartu. Laiko tarpas, per kurį pradinis radioaktyviojo elemento kiekis sumažėja perpus, vadinamas *skilimo pusamžiu*.
Gamtoje aptikti radioaktyvieji elementai skirstomi į tris grupes: urano, aktinio bei torio. Yra ir dar viena grupė — neptūnio grupė, tačiau ji sudaryta iš dirbtinai pagaminto elemento plutonio (Pu-241), kurio gamtoje nerandama. Iš urano grupę apibūdinančios diagramos (→ 6) matyti, kad pirmasis jos izotopas yra uranas (^{238}U), o paskutinysis — švinas (^{206}Pb).
Medžiagos gabalėlio, sudaryto tik iš ^{238}U arba iš kurio nors kito pirminio izotopo, sudėtis ilgainiui pakinta. Jis jau yra ne vien pradinis izotopas, bet dar turi tam tikrą dalį kitų elementų. Pagal kitų grupės elementų, esančių tame medžiagos gabalėlyje, kiekį galima sužinoti to gabalėlio amžių. Šiais tyrimais remiamasi nustatant archeologinių radinių ir iškasenų amžių.

Branduolinės reakcijos

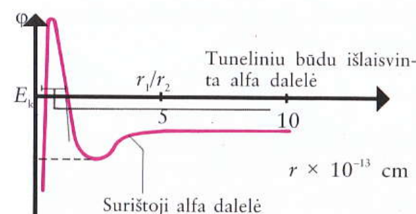
Gamtinės radioaktyviosios medžiagos savaime virsta kitomis skirtingomis medžiagomis. Tam tikromis sąlygomis du branduoliai gali pasikeisti savo nukleonais, sudarydami kitus branduolius. Čia kalbame apie dirbtinę branduolinę reakciją. Jai vykstant, turi būti išsaugotas bendras elektros krūvis, nukleonų skaičius ir reliatyvistinė energija. Pirmąją dirbtinę branduolinę reakciją 1919 m. įvykdė E. Rezerfordas. Apšaudydamas azotą alfa dalelėmis, jis gavo deguonį ir protoną. Šios reakcijos schema pavaizduota 87 puslapyje (→ 1). Reakcijos lygtį galime užrašyti taip:



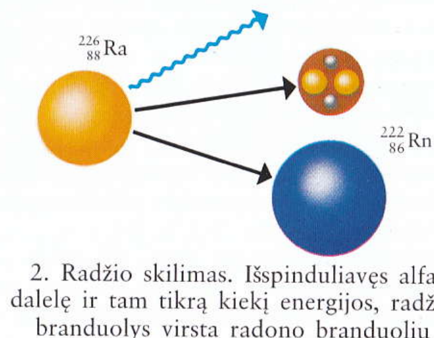
$$^4_2He + ^{14}_7N \to ^{18}_9F \to ^{17}_8O + ^1_1H.$$

Elementų simbolių apatinių indeksų suma prieš reakciją ir po jos yra 9 (tai krūvio tver-

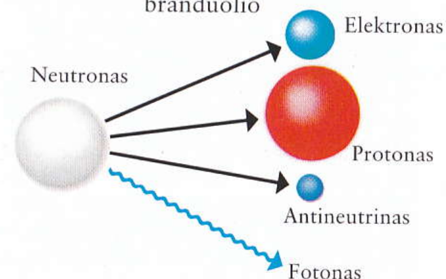
Branduolinės reakcijos



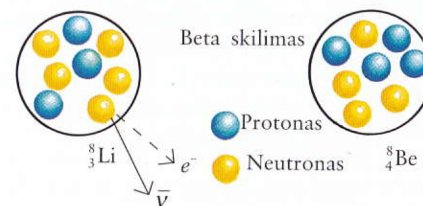
1. Branduolio potencialo kitimas ir alfa dalelės išlaisvinimas iš sunkiojo branduolio



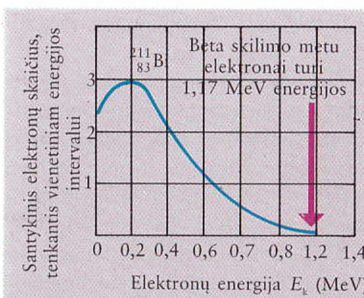
2. Radžio skilimas. Išspinduliavęs alfa dalelę ir tam tikrą kiekį energijos, radžio branduolys virsta radono branduoliu



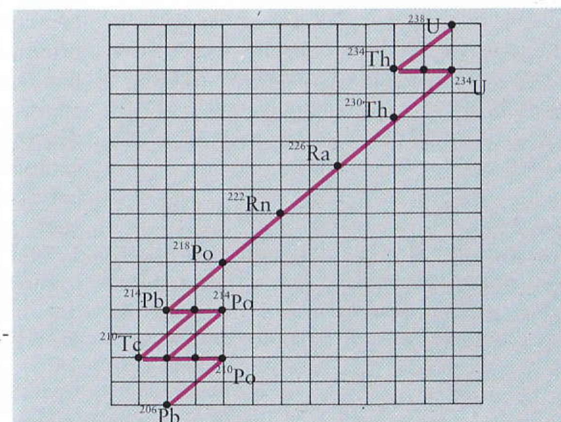
3. Neutrono beta skilimas. Už branduolio ribų neutronas skyla (jo skilimo pusamžis lygus 11 minučių) virsdamas protonu



4. Ličio ^8_3Li virsmas beriliu ^8_4Be vykstant beta skilimui: neutronas virsta protonu, išspinduliuodamas elektroną ir antineutriną



5. Radioaktyviojo atomo išspinduliuotų elektronų santykinio skaičiaus priklausomybė nuo jų kinetinės energijos

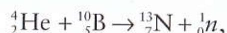


6. Urano radioaktyviųjų elementų grupė: įstrižos atkarpos rodo alfa skilimus, horizontalios — beta skilimus

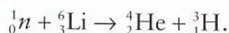
mės sąlyga), o viršutinių indeksų suma — 18 (tai nukleonų skaičiaus tvermės sąlyga). Protono ir deguonies atomo masių suma yra šiek tiek didesnė už alfa dalelės bei azoto atomo masių sumą, bet šį *masės defektą* kompensuoja reakcijoje dalyvaujančių dalelių energija. Kai alfa dalelės kinetinė energija lygi 9 MeV (ji atitinka masę, didesnę negu masės defektas), energijos perteklius kinetinės energijos pavidalu pasiskirsto tarp reakcijos produktų $^{17}_{8}O$ ir $^{1}_{1}H$.

Vykstant šiai reakcijai, greita alfa dalelė įsiskverbia į azoto branduolį, sudarydama naują elementą, kurio atominis skaičius 9. Tai fluoro izotopas. Gamtoje jo neranda-ma, nes yra labai nestabilus. Fluorui skylant, susidaro stabilus deguonies izotopas, be to, išlekia vienas protonas.

Kituose paveiksluose (→ 2, 3) pavaizduotos šios reakcijos:



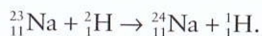
$$^{4}_{2}He + ^{10}_{5}B \rightarrow ^{13}_{7}N + ^{1}_{0}n,$$



$$^{1}_{0}n + ^{6}_{3}Li \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{3}_{1}H.$$

Abiejų reakcijų galutiniai produktai yra nestabilūs izotopai. Azoto $^{13}_{7}N$ skilimo pusamžis — 10 min, tričio $^{3}_{1}H$ — 5600 metų. Abiem izotopams būdingas beta skilimas (→ 4, 5).

Kiti radioaktyvieji izotopai gali atsirasti vykstant branduolinei reakcijai. Pavyzdžiui, apšaudant natrį $^{23}_{11}Na$ deuteronais $^{2}_{1}H$ (deuterio branduoliais), gaunamas natrio izotopas $^{24}_{11}Na$ ir vienas protonas. Šios reakcijos lygtį galima užrašyti taip:



$$^{23}_{11}Na + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{24}_{11}Na + ^{1}_{1}H.$$

Natrio izotopas $^{24}_{11}Na$ nestabilus; skildamas jis išspinduliuoja beta dalelę ir virsta stabiliuoju magniu. Radioaktyviojo natrio skilimo pusamžis — 14,8 valandos.

Žmogaus pagaminti radioaktyvieji izotopai, kurių nėra gamtoje, vadinami *dirbtinai radioaktyviais*. Jie labai plačiai taikomi medicinoje.

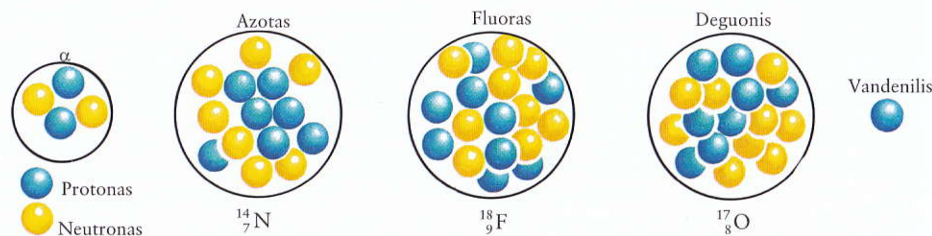
Antimedžiaga

Pozitrono masė lygi elektrono masei, o elektros krūvis yra tokio pat didumo, bet priešingo ženklo. Taigi pozitronas yra veidrodinis elektrono atspindys. Susidurdamas su elektronu, jis anihiliuoja ir kartu išspinduliuoja du ar daugiau gama fotonų. Prieš anihiliuodamos abi dalelės sudaro tam tikros rūšies atomą — *pozitronį* (→ 6). Ir vienos, ir kitos dalelės masė lygi 0,51 MeV. Joms yrant, susidaro fotonai, kurių visa energija yra maždaug 1,02 MeV.

Su 1,02 MeV energijos fotonu galima sukurti elektrono ir pozitrono porą ten, kur egzistuoja labai stiprus elektrinis laukas (→ 7), pavyzdžiui, arti sunkiųjų branduolių. Į švininę plokštelę nukreipus atitinkamo dažnio Rentgeno spindulius, joje generuojamos elektronų ir pozitronų poros. Taigi spinduliavimas paverčiamas medžiaga. Elektronas ir pozitronas yra ne vienintelė *dalelės ir antidalelės* pora. Iš tikrųjų, pagal reliatyvistinę kvantinę teoriją, *kiekviena* elementarioji dalelė turi tos pačios masės, tik priešingo krūvio antidalelę.

Bandymais įsitikinus, kad egzistuoja pozitronis, pradėta ieškoti antiprotonų ir antineutronų. Apie 1950-uosius metus buvo gautos ir atpažintos protonų ir antiprotonų bei neutronų ir antineutronų poros, kurių energija atitinkamai lygi 1876,6 MeV ir 1879,5 MeV. Teoriškai būtų galima sukurti ir antiatomus, sudarytus iš antiprotonų, antineutronų ir antipozitronų (→ 8). Susiliesdami su įprasta medžiaga, jie anihiliuotų.

Antimedžiaga

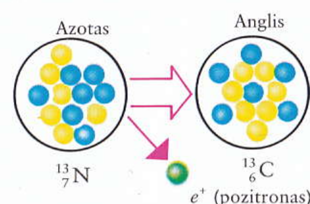


1. Dirbtinės branduolinės reakcijos schema

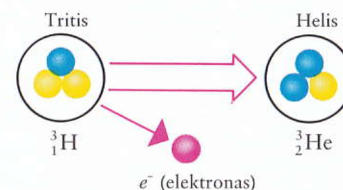


2. Branduolinės reakcijos $^{4}_{2}He + ^{10}_{5}B \rightarrow ^{13}_{7}N + ^{1}_{0}n$ schema

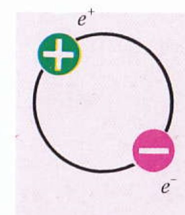
3. Branduolinės reakcijos $^{1}_{0}n + ^{6}_{3}Li \rightarrow ^{3}_{1}H + ^{4}_{2}He$ schema



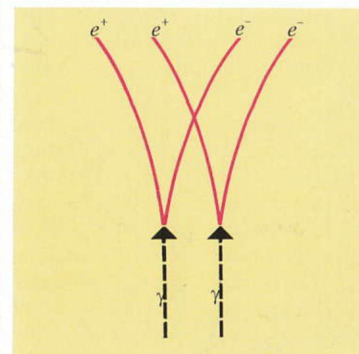
4. Azoto izotopas $^{13}_{7}N$ yra radioaktyvus ir skildamas išspinduliuoja beta daleles



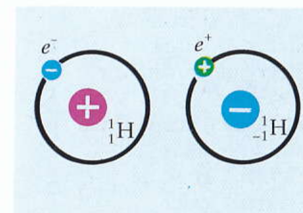
5. Tritis $^{3}_{1}H$ yra radioaktyvusis vandenilio izotopas; skildamas jis išspinduliuoja beta daleles



6. Pozitronis sudarytas iš vieno elektrono ir vieno pozitrono



7. V raidės formos trajektorija yra elektrono ir pozitrono poros, gautos materializuojant Rentgeno spindulius. Magnetinis laukas kreipia priešingo ženklo krūvininkus į priešingas puses



8. Medžiaga ir antimedžiaga: kairėje — vandenilio atomas, dešinėje — antivandenilio atomas, sudarytas iš pozitrono ir antiprotono

Pagrindiniai fizikiniai dydžiai ir jų matavimo vienetai

Dydis	Dydžio simbolis	SI vienetas	Vieneto simbolis
Ilgis	l	Metras	m
Masė	m	Kilogramas	kg
Laiko tarpas	t	Sekundė	s
Elektros srovės stipris	I, i	Amperas	A
Temperatūra	T	Kelvinas	K
Medžiagos kiekis	ν	Molis	mol
Šviesos stipris	I	Kandela	cd

Išvestiniai fizikiniai dydžiai ir jų matavimo vienetai

Dydis	Dydžio simbolis	SI vienetas	Vieneto simbolis	Vieneto sąryšis su pagrindiniais vienetais
Plotas	S	Kvadratinis metras	m^2	
Tūris	V	Kubinis metras	m^3	
Kampas	α, φ	Radianas	rad	
Greitis	v	Metras per sekundę	m/s	
Pagreitis	a, g	Metras sekundei kvadratu	m/s^2	
Dažnis	f, ν	Hercas	Hz	$1\ Hz = 1\ s^{-1}$
Jėga	F	Niutonas	N	$1\ N = 1\ m \cdot kg/s^2$
Jėgos momentas	M	Niutonmetras	Nm	
Darbas	A	Džaulis	J	$1\ J = 1\ m^2 \cdot kg/s^2$
Energija	E, W	Džaulis	J	$1\ J = 1\ m^2 \cdot kg/s^2$
Galia	P	Vatas	W	$1\ W = 1\ J/s = 1\ m^2 \cdot kg/s^3$
Judesio kiekis, impulsas	p, mv	Niutonsekundė	Ns	
Tankis	ρ	Kilogramas kubiniam metrui	kg/m^3	
Slėgis	p	Paskalis	Pa	$1\ N/m^2 = 1\ kg/(m \cdot s^2)$
Elektros krūvis	Q, q	Kulonas	C	$1\ C = 1\ A \cdot s$
Elektrinio lauko stipris	E	Niutonas kulonui Voltas metrui	N/C V/m	
Elektrinis potencialas	V, φ	Voltas	V	$1\ V = 1\ W/A$
Elektrinė įtampa, potencialų skirtumas	U, $\Delta\varphi$	Voltas	V	$1\ V = 1\ W/A$
Elektrinė talpa	C	Faradas	F	$1\ F = 1\ C/V$
Elektrinė konstanta	ε_0	Faradas metrui	F/m	
Elektrinė varža	R, r	Omas	Ω	$1\ \Omega = 1\ V/A$
Savitoji elektrinė varža	ρ	Ommetras	Ωm	
Induktyvumas	L	Henris	H	$1\ H = 1\ V \cdot s/A$
Elektros energija	E	Džaulis	J	$1\ J = 1\ m^2 \cdot kg/s^2$
Elektros galia	P	Vatas	W	$1\ W = 1\ V \cdot A$
Magnetinė indukcija	B	Tesla	T	$1\ T = 1\ N/(A \cdot m) = 1\ Wb/m^2$
Magnetinė konstanta	μ_0	Henris metrui	H/m	
Magnetinė skvarba	μ	Henris metrui	H/m	
Magnetinės indukcijos srautas	Φ	Vėberis	Wb	$1\ Wb = 1\ V \cdot s$

Žodynėlis

Atomas (gr. *atomos* — nedalus) anksčiau buvo laikomas mažiausia medžiagos dalele, turinčia jos savybių. Dabar žinoma, kad atomas sudarytas iš jo centre esančio teigiamai elektringo branduolio bei aplink jį skriejančių neigiamai elektringų elektronų. Stabilaus atomo elektros krūvis lygus nuliui.

Atomo modelis — atomo sandaros schema; įvairūs atomų modeliai buvo pasiūlyti XX amžiaus pradžioje.

Cheminis junginys — medžiaga, sudaryta iš dviejų ar daugiau skirtingų rūšių atomų.

Darbas — dydis, išreiškiamas jėgos, veikiančios kūną, ir kūno nueito kelio jėgos veikimo kryptimi sandauga. Kai jėgos veikiamas kūnas nepasislenka, darbas lygus nuliui.

Degimas — cheminio elemento ar junginio ir deguonies reakcija, kurios metu išsiskiria šiluma.

Elektronas — nedaloma subatominė dalelė, turinti neigiamą elektros krūvį. Elektrono krūvis yra pats mažiausias gamtoje egzistuojantis elektros krūvis, kitų dalelių krūvis yra elektrono krūvio kartotinis.

Elektros srovė — kryptingas elektringųjų dalelių judėjimas laidininke, kurį veikia elektrinis laukas.

Energija — kūno gebėjimas atlikti darbą dėl savo fizinės ar cheminės būsenos.

Entropija — kūno, sistemos ar visatos energinių procesų negrįžtamumo matas, apibūdinantis netvarkos laipsnį.

Galia — dydis, rodantis, kiek energijos (mechaninės, elektros, šiluminės ir kt.) panaudojama per vienetinį laiką, vykstant tam tikram reiškiniui.

Jėga — aprašymas priežasties, keičiančios kūno rimties būseną ar jo judėjimą. Ji nusakoma jos didumu, veikimo kryptimi ir veikimo tašku.

Jonas — darinys, gaunamas iš neutralaus atomo ar molekulės, prijungiant prie jų ar atimant iš jų vieną ar daugiau elektronų ar elektringųjų atominių grupių. Jonas turi teigiamą arba neigiamą elektros krūvį.

Laukas — erdvės vieta, kurioje reiškiasi elektrinės, magnetinės ar gravitacijos jėgos.

Masė — kūno inercijos matas. Kūno masę m ir energiją E sieja A. Einšteino nustatytas sąryšis $E = mc^2$; čia c — šviesos greitis vakuume.

Medžiaga — tai, iš ko sudaryti juntami kūnai, turintys tam tikrą tankį, masę ir inercinių savybių, užimantys tam tikrą vietą erdvėje ir galintys turėti tam tikrą formą. Medžiaga sudaryta iš cheminių elementų molekulių arba jų junginių.

Molekulė — dviejų ar daugiau vienodų arba skirtingų atomų, susietų elektromagnetinėmis jėgomis, sistema.

Pagreitis — greičio pokytis per vienetinį laiką, arba greičio kitimo greitis.

Radioaktyvumas — reiškinys, būdingas kai kuriems gamtiniams ir dirbtiniams (transuraniniams) cheminiams elementams, kurių branduoliai nuolat kinta (šis kitimas vadinamas branduolių *radioaktyviuoju skilimu*). Radioaktyviosios medžiagos skleidžia trijų rūšių spindulius: alfa spindulius (sudarytus iš helio atomų branduolių), beta spindulius (sudarytus iš elektronų) ir gama spindulius (trumpas elektromagnetines bangas, arba fotonus).

Spektras — vaizdas, gautas suprojektavus ekrane prizmės išskaidytą tiriamąjį šviesos spindulių pluoštą.

Spinduliuotė — elektromagnetinės energijos sklidimas, kuris egzistuoja kartais kaip elektromagnetinė banga, kartais kaip fotonų ar dalelių srautas.

Sunkis — jėga, kuri, veikdama kūną, suteikia jam pagreitį, lygų vietiniam laisvojo kritimo pagreičiui toje atskaitos sistemoje.

Svoris — jėga, kuria kūnas dėl Žemės traukos veikia pakabą arba atramą.

Šiluma — kūno energijos rūšis, susijusi su tą kūną sudarančių molekulių judėjimu. Šilumą apibūdina kūno temperatūra. Kuo šiltesnis kūnas, tuo labiau juda jo molekulės. Judėdamos jos gali atlikti mechaninį darbą, pavyzdžiui, plėsdamiesi karšti garo mašinos garai spaudžia stūmoklį.

Temperatūra — kūną sudarančių dalelių vidutinės šiluminio judėjimo energijos matas.

Termodinamika — fizikos mokslo šaka, nagrinėjanti šiluminius reiškinius, šiluminės energijos virsmą darbu ar kitų rūšių energija bei šiluminių mašinų veikimą.

Trintis — medžiagos savybė priešintis virš jos ar jos viduje esančio kūno slydimui ar sukimuisi.

Dalykinė rodyklė

ILIUSTRACIJŲ RODYKLĖ

ILIUSTRUOTAS ŽINYNAS

Dar šios serijos leidžiama:

ANATOMIJA. ŽMOGUS
FIZIOLOGIJA. ŽMOGUS
ZOOLOGIJA. BESTUBURIAI
ZOOLOGIJA. STUBURINIAI
BOTANIKA
CHEMIJA
ASTRONOMIJA

ISBN 5-430-02799-5